

Titre: Automatisation des opérations de masquage pour la projection au plasma de revêtements thermiques sur des composants de moteurs d'aéronefs
Title:

Auteur: Philippe St-Jacques
Author:

Date: 2012

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: St-Jacques, P. (2012). Automatisation des opérations de masquage pour la projection au plasma de revêtements thermiques sur des composants de moteurs d'aéronefs [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/1015/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1015/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Lionel Birglen
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

AUTOMATISATION DES OPÉRATIONS DE MASQUAGE POUR LA PROJECTION
AU PLASMA DE REVÊTEMENTS THERMIQUES SUR DES COMPOSANTS DE
MOTEURS D'AÉRONEFS

PHILIPPE ST-JACQUES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
DÉCEMBRE 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

AUTOMATISATION DES OPÉRATIONS DE MASQUAGE POUR LA PROJECTION
AU PLASMA DE REVÊTEMENTS THERMIQUES SUR DES COMPOSANTS DE
MOTEURS D'AÉRONEFS

présenté par : ST-JACQUES Philippe

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. GOURDEAU Richard, Ph.D., président

M. BIRGLEN Lionel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., membre

*À Marie-Ève,
À Jean Leclerc,
Pour m'avoir poussé au dépassement*

Remerciements

D'abord, je dois remercier les employés de Pratt & Whitney Canada. Leur expérience m'a guidé dans la recherche de solutions pratiques et leur savoir-faire m'a orienté dans la conception des divers systèmes que nous avons fabriqués. Un merci très particulier à Canam Hoang, qui m'a suivi tout au long du projet et m'a encouragé dans toutes mes démarches. Merci à Éric Gagnon et Jean-Sébastien Lafrance pour leur appui indéfectible.

Que ce soit pour fournir des échantillons ou encore pour une visite aux États-Unis, l'aide de quelques fournisseurs a ouvert de nombreuses portes. Certains équipements spécialisés ont été fournis gracieusement et je suis grandement reconnaissant envers ces gens qui font un travail exceptionnel pour leur entreprise. Un merci tout particulier à Randy Anthony.

Je me dois de souligner la contribution vitale du FQRNT et du CRSNG qui m'ont subventionné durant deux ans via le programme de bourses en milieu pratique BMP Innovation.

C'est sous la direction du professeur Lionel Birglen, du département de génie mécanique et de la concentration mécatronique de l'École Polytechnique de Montréal, que j'ai atteint mes objectifs malgré le défi énorme que représentait ce projet. Son suivi serré ainsi que ses conseils judicieux autant sur le plan académique que scientifique m'ont permis de respecter mes engagements et de vous présenter ce mémoire.

Résumé

Les parties internes des turbines à gaz sont exposées à des gaz de combustion et subissent des températures très élevées ainsi que des réactions de corrosion accélérée. Afin de protéger les pièces de ces conditions de service extrêmes, un revêtement thermique composé de céramique est appliqué par projection au plasma. Ce procédé consiste à projeter à très hautes température des particules en fusion qui adhèrent au contact du métal en se solidifiant.

Pour appliquer la céramique de façon précise et pour éviter d'obstruer de petites conduites de refroidissement, un masque est utilisé durant le revêtement au plasma. Ce masque est souvent réalisé dans l'industrie de façon entièrement manuelle par application d'un ruban adhésif protecteur. La précision requise ainsi que la grande variété de géométries à couvrir font du masquage une opération très complexe et difficilement automatisable.

Ce mémoire propose une solution alternative au masquage manuel par l'application automatisée de polymères résistants au jet de plasma. L'endurance du nouveau produit ainsi que sa conformité avec les normes de l'industrie ont été validées par une série d'analyses sur des pièces représentatives. Un modèle géométrique de déposition est présenté en vue de prédire la couverture du fluide en fonction des différents paramètres d'application. Plusieurs stratégies de mouvement du robot ont été évaluées pour des surfaces planes ainsi que des pièces de révolution. Sur la base du modèle géométrique, des méthodes d'optimisation de la trajectoire sont proposées en vue de maintenir une épaisseur constante. Enfin, les résultats obtenus démontrent qu'il est possible d'automatiser les opérations de masquage sur les composants de turbines et ouvrent la porte à de nombreuses améliorations à la fois en qualité et en performance du procédé de revêtement au plasma dans l'industrie aérospatiale.

Abstract

The inner sections of a gas turbine are exposed to combustion gases and experience high temperatures as well as accelerated corrosion reactions. To protect parts from these extreme operating conditions, a ceramic thermal barrier coating or TBC is applied by plasma spray. This process consists of projecting molten particles at very high temperature on the substrate, on which it solidifies upon contact.

To apply the ceramic accurately and to avoid clogging of small cooling hole, a mask is used during the plasma coating. This mask is mainly achieved in the industry by manual application of a protective tape. The required accuracy and the wide variety of geometries to cover make masking a very complex and difficult task to automate.

This memoir introduces an alternative to manual masking by mean of automated application of plasma spray resistant polymers. The endurance of the new product and its compliance with the industry standards have been validated by a series of experiments on representative parts. A geometric model of deposition is used to predict surface coverage according to the different application parameters. Several strategies for robot motion planning were evaluated on flat surfaces and rotating parts. On the basis of the geometric model, trajectory optimization methods are proposed to maintain a constant thickness and edge definition. Finally, the results show that it is possible to automate the masking operations on turbine components and open the door to many improvements in both quality and performance for the plasma spray coating method in the aerospace industry.

Table des matières

Dédicace	iii
Remerciements	iv
Résumé	v
Abstract	vi
Table des matières	vii
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xi
Liste des annexes	xiv
Liste des sigles et abréviations	xv
Introduction	1
Chapitre 1 Étude de cas et proposition de recherche	3
1.1 Revue de littérature	3
1.1.1 Processus de déposition par plasma	3
1.1.2 Revêtements thermiques	5
1.1.3 Zones à protéger du plasma	5
1.2 Procédé actuel de masquage	7
1.2.1 Vue d'ensemble	7
1.2.2 Méthodes et outillage	7
1.2.3 Synthèse des géométries à masquer	11
1.3 Proposition d'une nouvelle méthode	12
1.3.1 Solutions alternatives au ruban de masquage	12
1.3.2 Types de masques applicables chez P&WC	12
1.3.3 Solution retenue	15

Chapitre 2	Validation du nouveau procédé	16
2.1	Tests d'endurance préliminaires sur la résine	16
2.2	Mesures des conditions thermiques	17
2.2.1	Thermocouples avec collecteur tournant	18
2.2.2	Plaquettes avec une configuration du deuxième type	21
2.2.3	Mesures sur une pièce complexe	23
2.3	Analyse microscopique de l'interface TBC/métal	27
2.3.1	Observations sur les deux méthodes de masquage	27
2.3.2	Interaction entre le masque et le dépôt par plasma	27
2.3.3	Impacts sur la qualité	28
2.4	Méthodes d'application du masque	30
2.4.1	Vaporisation	30
2.4.2	Déposition directe	31
2.5	Méthodes de retrait du masque	32
2.5.1	Incinération du masque	32
2.5.2	Trempage dans un bain UCL	35
2.5.3	Jet d'eau abrasif	35
2.6	Environnement Santé et Sécurité (ESS)	38
2.7	Sources des variations	39
Chapitre 3	Modèle de déposition automatisée	40
3.1	Équipement et préparation de la cellule	40
3.2	Caractérisation de l'écoulement	42
3.2.1	Courbes pression-débit	42
3.2.2	Vitesse d'avance relative à V_u	45
3.2.3	Effet de la vitesse sur le profil obtenu	46
3.3	Stratégies d'approche et de remplissage	50
3.3.1	Approche et retrait de la pièce	51
3.3.2	Stratégies de remplissage	51
3.3.3	Optimisations	54
3.3.4	Choix des stratégies ou optimalité selon le contexte	60
3.4	Calibration et systèmes de coordonnées	61
3.5	Programmation du robot	62
3.5.1	Approche par interruption	63
3.5.2	Structures de données	63
3.5.3	Génération de trajectoire	63

3.5.4	Synchronisation de la table rotative	70
3.5.5	Masquage d'une pièce de révolution	70
Conclusion	74
Références	78
Annexes	79

Liste des tableaux

TABLEAU 3.1	Paramètres de l'écoulement pour la résine choisie	45
TABLEAU 3.2	Paramètres décrivant la déposition pour la caractérisation du cordon en fonction de la vitesse	47
TABLEAU 3.3	Valeurs de $v_{12,i}$ en fonction de la dimension de la zone d_i	59
TABLEAU 3.4	Paramètres décrivant la déposition de résine sur une pièce	73

Liste des figures

FIGURE 1.1	Illustration des composants d'un plasmatron (<i>Thermal Spraying Process</i>)	4
FIGURE 1.2	Configurations typiques à protéger du revêtement au plasma	6
FIGURE 1.3	Schéma du processus de revêtement au plasma	7
FIGURE 1.4	Deux largeurs typiques de ruban adhésif	8
FIGURE 1.5	Deux catégories de bouchons utilisés pour protéger les trous de grandes tailles	8
FIGURE 1.6	Masques rigides pour la protection indirecte	9
FIGURE 1.7	Zone de transition typique identifiée BX et zone masquée indiquée en gras	9
FIGURE 1.8	Divers outils utilisés pour le masquage manuel	10
FIGURE 1.9	Sous-ensembles de géométries à masquer	11
FIGURE 1.10	Exemple d'applicateur de fibres pour la fabrication de composites (DEBOUT, CHANAL et DUC, 2011)	14
FIGURE 1.11	Délamination d'un dépôt de TBC sur un substrat d'aluminium anodisé	14
FIGURE 2.1	Divers masques exposés sans refroidissement	16
FIGURE 2.2	Échantillons à diverses étapes du processus avec refroidissement . . .	17
FIGURE 2.3	Amincissement graduel de la résine au cours du procédé	17
FIGURE 2.4	Mesure de la température sur les chambres à combustion	18
FIGURE 2.5	Système de refroidissement à l'air pour la déposition au plasma . . .	20
FIGURE 2.6	Impact du refroidissement à l'air sur la température des échantillons .	20
FIGURE 2.7	Comparaison des températures des quatre thermocouples	21
FIGURE 2.8	Tubes de refroidissement flexibles pour le montage alternatif	22
FIGURE 2.9	Résultats dans les conditions expérimentales avec les tubes flexibles .	22
FIGURE 2.10	Variation de température entre les quatre thermocouples	22
FIGURE 2.11	Température maximale avec refroidissement à 64 mm de distance . .	23
FIGURE 2.12	Masquage sur une petite section extérieure de chambre à combustion	23
FIGURE 2.13	Disposition des thermocouples sur la face intérieure d'une pièce de grande taille	24
FIGURE 2.14	Instrumentation d'une pièce de grande taille	24
FIGURE 2.15	Amplitude de température due au refroidissement interpasse	25
FIGURE 2.16	Température pour les quatre thermocouples durant une seule passe de couche métallisante	25

FIGURE 2.17	Contribution de la révolution de la pièce à la température mesurée . .	26
FIGURE 2.18	Instrumentation de bouchons pour des mesures non-invasives	27
FIGURE 2.19	Pénétration de la résine dans des trous de diamètres variés	28
FIGURE 2.20	Accumulation de poudre sur le ruban	28
FIGURE 2.21	Interaction du ruban adhésif avec la déposition au plasma	29
FIGURE 2.22	Intégrité de la céramique à l'interface selon le type de masque employé	30
FIGURE 2.23	31
FIGURE 2.24	Filaments et débordement observés lors de la vaporisation	31
FIGURE 2.25	Exemple d'embouts évalués	32
FIGURE 2.26	Four expérimental de traitement thermique	33
FIGURE 2.27	Résidus de combustion sous forme de cendres	33
FIGURE 2.28	Oxydation à la surface des échantillons, surtout aux extrémités	34
FIGURE 2.29	Traces bleues à la surface des échantillons	34
FIGURE 2.30	Résine incinérée	34
FIGURE 2.31	Délamination après trempage dans l'eau chaude	35
FIGURE 2.32	Buse de 3 mm utilisée	36
FIGURE 2.33	Retrait de la résine au jet d'eau abrasif	37
FIGURE 2.34	Nettoyage des trous d'effusion en deux étapes (1) et (2)	37
FIGURE 2.35	Configurations typiques où l'accès aux deux faces est limité ou impossible	38
FIGURE 3.1	Cellule robotique utilisée pour la preuve de concept	40
FIGURE 3.2	Connection de l'outil au robot via un changeur d'outil	41
FIGURE 3.3	Divers équipements utilisés pour la déposition automatisée	42
FIGURE 3.4	Pièce typique montée sur le poteau	43
FIGURE 3.5	Conception initiale de monture ajustable pour le fusil	43
FIGURE 3.6	Perte de masse mesurée lors de la cuisson UV	44
FIGURE 3.7	Débit mesuré en fonction de divers embouts et fusils	44
FIGURE 3.8	Section d'un cordon type déposé par le robot et visualisée dans un logiciel de traitement de nuages de points	45
FIGURE 3.9	Mesure au microscope des dimensions importantes des embouts	46
FIGURE 3.10	Vitesse d'avance V_u en fonction de P pour un embout oval	47
FIGURE 3.11	Échantillon couvert de nitrate de bore pour faciliter la numérisation .	47
FIGURE 3.12	Numérisation 3D d'un cordon au moyen d'un bras FARO muni d'une caméra laser	48
FIGURE 3.13	Mesure de l'épaisseur des cordons	48
FIGURE 3.14	Extraction des profils de section des cordons	49
FIGURE 3.15	Épaisseur des cordons en fonction de la vitesse d'avance	49

FIGURE 3.16	Largeur des cordons en fonction de la vitesse d'avance	49
FIGURE 3.17	Corrélation entre l'aire mesurée et l'aire prédite	50
FIGURE 3.18	Délai d'approche $d_{t,0}$ et de retrait $d_{t,1}$ de l'outil	51
FIGURE 3.19	Trajectoire générée par une stratégie de type "discontinu" et illustration des paramètres l_n et l_i utilisés dans les calculs	52
FIGURE 3.20	Trajectoire générée par une stratégie de type "méandre"	53
FIGURE 3.21	Trajectoire générée par une stratégie de type "contour"	53
FIGURE 3.22	Illustration des dimensions principales et secondaires de l'outil	54
FIGURE 3.23	Discontinuité dans les vitesses du TCP suite à une commande échelon en vitesse pour la stratégie méandre	55
FIGURE 3.24	Profil de vitesse pour une trajectoire de type "discontinu" ne présentant pas de discontinuités	56
FIGURE 3.25	Régulateur de pression ITV1000 de la compagnie SMC	56
FIGURE 3.26	Boucle de compensation dynamique de la pression en fonction du taux de recouvrement et de la vitesse instantanée	57
FIGURE 3.27	Illustration des variables utilisées dans le calcul pour l'optimisation de la trajectoire "méandre"	58
FIGURE 3.28	Discontinuité dans les vitesses suite à une commande échelon en vitesse (stratégie méandre avec des points intermédiaires)	60
FIGURE 3.29	Illustration du "zonedata" dans un contrôleur ABB tirée du manuel de référence technique pour les instructions du langage RAPID	60
FIGURE 3.30	Repères utilisés par le programme (tiré de la documentation de référence de ABB)	61
FIGURE 3.31	Illustration du référentiel outil (tiré de la documentation de référence de ABB)	62
FIGURE 3.32	Transposition de la stratégie méandre sur une surface de révolution	62
FIGURE 3.33	Cheminement logique du générateur de trajectoires hors-ligne	65
FIGURE 3.34	Extraction des points et des normales sur une section de la pièce	65
FIGURE 3.35	Spécification du quadrant pour les articulations du robot	68
FIGURE 3.36	Visualisation des coordonnées robots dans le repère pièce générées par le post-processeur dans RobotStudio	70
FIGURE 3.37	Bande de résine simple sur une chambre à combustion	72
FIGURE A.1	Délamination d'un dépôt de TBC sur un substrat d'aluminium anodisé	79
FIGURE A.2	Masque réutilisable pour les boîtiers d'engrenage (image provenant de 'Greentree Shercon')	80
FIGURE A.3	Bagues extensibles	81

Liste des annexes

ANNEXE A Optimisation globale du procédé de déposition par plasma	79
A.1 Adhérence du TBC sur des oxydes	79
A.2 Masques réutilisables	80
A.3 Programmation hors-ligne	81
A.4 Répétabilité de la lance au plasma ou plasmatron	81
A.5 Contrôle actif de la température pièce	82
A.6 Cold spray de la couche métallisante	83

Liste des sigles et abréviations

Vocabulaire lié à la terminologie des pièces aéronautiques

MOS	Gammes de fabrication ou <i>Manufacturing Operations Sheet</i>
P&WC	Utilisé en lieu et place de Pratt & Whitney Canada
Trous d'effusion	Petits trous percés en rangées selon un patron spécifique servant au refroidissement de la pièce durant la combustion en formant un film d'air froid entre les gaz chaud et la parois interne de la pièce
Trous de dilution	Trous de plus grande taille responsables de l'apport en oxygène pour la réaction de combustion
Zone chaude	Section du moteur où la température est supérieure à 750 C
Zone froide	Section du moteur où la température est inférieure à 750 C

Vocabulaire lié à la robotique

Cinématique inverse	Calcul géométrique des coordonnées articulaires à partir de la position de l'outil dans l'espace cartésien
Quaternion	Représentation mathématique d'une orientation utilisant des nombres complexes à trois dimensions
TCP	<i>Tool center point</i> ou centre de l'outil exprimé dans le repère du porte-outil sur un robot

Vocabulaire lié à la déposition par plasma

BC	<i>Bond Coat</i> , poudre d'alliage de nickel pour projection au plasma
TC	<i>Top Coat</i> , couche de céramique appliquée sur le BC
TBC	<i>Thermal Barrier Coating</i> , revêtement de protection déposé sur les pièces à haute température de service
Plasma	État de la matière à haute énergie dont une partie ou la totalité des particules sont ionisées
Phanatron	Convertisseur formé d'un tube électronique qui sert à transformer du courant alternatif en courant unidirectionnel
Plasmatron	Phanatron à décharge contrôlée, ou appellation exacte de la torche au plasma

Rechargement	Pour la réparation, opération qui consiste à déposer une couche métallique sur une surface usée (normalement après un certain temps de service) en vue de pouvoir l'usiner de nouveau aux tolérances du dessin
Substrat	Surface métallique sous-jacente au revêtement sur laquelle est déposé le revêtement thermique

Introduction

Objectifs du projet

Le but de ce projet était de mener une étude de faisabilité pour savoir s'il était possible d'automatiser les opérations de masquage sur les chambres à combustion. En vue de répondre à cette question, quatre objectifs principaux ont été formulés pour tracer une ligne directrice répondant aux besoins de chaque partenaire du projet :

1. Étudier en détail le procédé de masquage actuel.
2. Effectuer une revue de littérature sur les méthodes antérieures, actuelles et émergentes de masquage.
3. Élaborer un plan de tests détaillé.
4. Réaliser les expériences et les tests d'automatisation sur un robot ou une autre machine.

Méthodologie

Au début du projet, le procédé de masquage pour le revêtement au plasma n'avait jamais sérieusement été étudié en profondeur par P&WC. La relative efficacité des méthodes manuelles a convaincu qu'il n'y avait pas d'urgence à agir en ce sens. L'amélioration des méthodes n'était pas une priorité et le remplacement du procédé actuel en partie ou en totalité n'avait jamais clairement été envisagés. Le travail accompli peut se diviser en quatre principaux volets qui ont été répartis sur un échéancier de deux ans.

Étude du procédé actuel et identification des objectifs

La première étape a été de recenser toutes les pièces qui sont masquées et d'identifier les méthodes employées présentement. Ensuite, les différentes géométries ou zones partagées entre ces pièces ont été catégorisées afin d'isoler les tâches de masquage à traiter en premier de celles pouvant être laissées à plus tard. Cette phase d'analyse a duré 4 mois à temps partiel. Elle a permis de tracer une ligne directrice et de fixer un échéancier pour le déroulement des prochaines étapes.

Recherche d'un masque alternatif

Une revue de littérature a permis de trouver l'ensemble des techniques de masquage existant dans l'industrie en général, sans égard à l'application spécifique du revêtement au plasma. Après avoir signé des accords de non-divulgateion, de nombreux fournisseurs au Canada et à l'étranger ont été contactés. Plusieurs ont envoyé des représentants chez P&WC directement. Des technologies potentiellement applicables à notre procédé ont été relevées durant ces rencontres et des tests d'applicabilité sommaires ont permis de choisir la technologie à être automatisée.

Validation du masque choisi

Pour obtenir une véritable méthode de masquage alternative, il fallait bien plus qu'une simple preuve de résistance à la flamme du plasma. De nombreuses analyses dans les laboratoires de P&WC ont permis de valider l'applicabilité du masque à l'intérieur de tolérances serrées, sa persistance jusqu'à son retrait définitif et la compatibilité du produit choisi avec le revêtement thermique. Pour cette étape, l'implication des fournisseurs a été d'une aide primordiale. Cette période a engendré des échanges d'information sur une base quotidienne, sous formes d'appels conférences, de visites de représentants et aussi de visites directement chez les fournisseurs, au Canada ou aux États-Unis. Cette phase du projet est détaillée au deuxième chapitre de ce mémoire.

Automatisation de la solution retenue

Cette dernière étape a nécessité l'aménagement d'un site de recherche où les tests d'automatisation pouvaient avoir lieu sans nuire à la production. Un espace fut loué à proximité du centre de réparation des moteurs à St-Hubert. Un robot y a été installé dans une cellule modifiée pour le procédé de masquage, munie d'axes externes pour manier les pièces et d'un système de filtration des vapeurs. Les divers degrés d'automatisation ont été ordonnés dans un plan expérimental, partant de la simple mesure du débit de résine déposée par le robot pour mener jusqu'à une application sur une pièce représentative. Un modèle de déposition global a été proposé, permettant de prédire la géométrie du masque appliqué. Un logiciel de génération de trajectoires hors-ligne a été écrit pour générer à partir du modèle 3D de la pièce le programme robot complet, incluant les appels d'interruption, les coordonnées et la gestion des entrées/sorties numériques. Cette phase du projet est présentée en détail au troisième chapitre.

Chapitre 1

Étude de cas et proposition de recherche

Ce chapitre a pour objectif de résumer les efforts de documentation et d'analyse réalisés en vue de donner une orientation claire à ce projet de recherche. Une revue de littérature a d'abord permis de comprendre le procédé de revêtement thermique par projection au plasma, de recenser les diverses méthodes de masquage utilisées dans l'industrie et d'identifier les problématiques spécifiques aux composants des turbines à gaz. Les méthodes et outils propres à Pratt & Whitney Canada ont ensuite été analysés en détail en vue de cerner les opportunités d'innovation en matière de déposition au plasma. Enfin, la technologie particulière retenue pour l'automatisation du masquage est présentée, formant la proposition principale de ce projet d'innovation technologique.

1.1 Revue de littérature

1.1.1 Processus de déposition par plasma

Le plasma

Il s'agit d'un état de la matière similaire au gaz, constitué en partie ou en totalité de particules ionisées et d'électrons. Il existe de façon naturelle dans la ionosphère terrestre, dans le vent interstellaire ou dans le coeur du soleil. Un plasma peut également être créé artificiellement au moyen d'un arc électrique, comme en témoignent les tubes à éclairage fluorescents ou le procédé qui nous intéresse particulièrement, le revêtement métallique par plasma.

Équipement

L'application par plasma (HELLUND, 1961) se fait au moyen d'un plasmatron, soit une lance conçue pour porter en état de fusion des particules solides en les injectant dans un mélange gazeux à haute énergie ionisé par un arc électrique de haute puissance (de l'ordre de 25 à 40 kW). Le plasma utilisé est un mélange d'argon et d'hydrogène, et parfois d'azote ou d'hélium. La composition du mélange gazeux affecte directement l'énergie et la conductivité thermique du plasma et conséquemment l'énergie transmise aux particules qui y sont en

suspension (SHANMUGAVELAYUTHAM et SELVARAJAN, 2003). Le revêtement ainsi déposé est alimenté sous forme de poudre via un distributeur pour être injectée de façon perpendiculaire à la flamme, qui atteint plus de $13\,000^{\circ}\text{C}$ (FAN, WANG et WANG, 2007). Les particules en fusion se solidifient au contact du substrat. Le point de fusion pour la céramique est de $4\,700^{\circ}\text{C}$. Alors que l'application de TBC se faisait auparavant de façon manuelle dans l'industrie (KOKINI, 1993), imposant le port de scaphandres et le recours à des mesures de protection individuelles lourdes, elle se fait désormais par des robots dans des enceintes contrôlées.

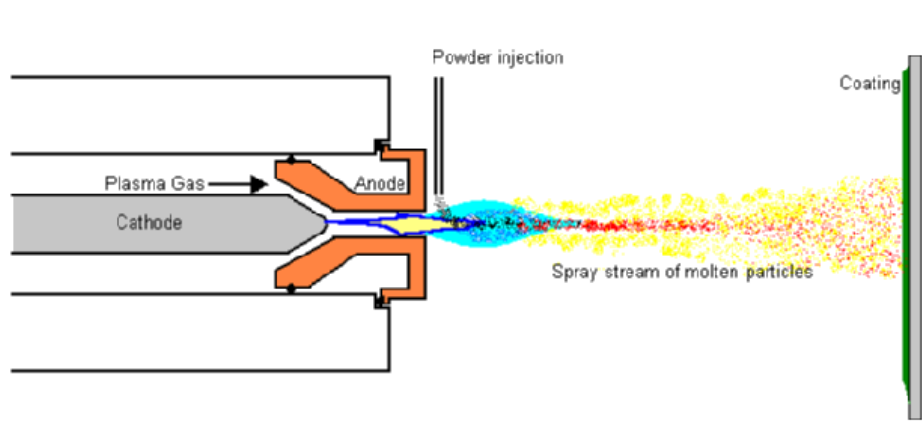


FIGURE 1.1 Illustration des composants d'un plasmatron (*Thermal Spraying Process*)

Variation du procédé de plasma

L'arc électrique se forme entre l'anode et la cathode (figure 1.1). La dimension de ces deux composants affecte directement le niveau d'énergie du plasma et donc l'énergie transmise aux particules injectées dans le mélange gazeux. La cathode est composée d'un alliage de tungstène et de thorium (2%) pour augmenter la résistance à l'oxydation et est enrobée de cuivre pour un meilleur refroidissement. Les décharges électriques causent une réduction de la cathode, ce qui a pour effet de diminuer avec le temps la résistivité de l'ensemble anode-cathode. Il en résulte alors une chute de tension. Puisque la lance de plasma est contrôlée en puissance constante, le courant est augmenté à mesure que la résistance décroît. Ceci accélère la réduction de la cathode et augmente la température du chalumeau. Pour ces raisons, les électrodes doivent être remplacées après environ 40 heures d'opération.

1.1.2 Revêtements thermiques

Le revêtement thermique peut consister uniquement d'une couche métallique de type MCrAlY¹ qui a pour principale fonction de protéger de l'oxydation et/ou de la corrosion à haute température. Sur les sections les plus chaudes, on ajoute une couche de céramique de type YSZ² formant une couche isolante efficace pour limiter la température de la pièce (SLIFKA et al., 1998). Lors de la production de pièce neuves, il est possible de percer les trous de refroidissement dans le substrat préalablement recouvert de céramique, ce qui évite le recours au masquage. Mais il n'est pas toujours possible d'éliminer complètement le masquage, puisqu'il faut par exemple protéger des zones réservées pour un assemblage ultérieur.

Les chambres de combustion sont conçues pour durer toutes la vie utile du moteur (plus de 10 000 h), contrairement à d'autres pièces qui sont remplacées périodiquement (aubes de turbines, boucliers thermiques, etc). Lors de réparations ou de mises à niveau majeures du moteur, il est fréquent d'enlever la céramique endommagée par jet d'eau abrasif puis d'appliquer une nouvelle couche par plasma. Il devient alors essentiel de préserver l'intégrité des trous de refroidissement pour ne pas altérer l'écoulement d'air dans une configuration de refroidissement³ spécifique.

1.1.3 Zones à protéger du plasma

Les zones primaires sont celles exposées directement à la flamme avec une distance de projection inférieure à 15 cm et correspondent à une adhérence maximale du revêtement. Les autres surfaces sont considérées dans la zone secondaire, et doivent être protégées de la projection indirecte qui a un pouvoir d'adhésion réduit. Le masque a trois principales fonctions :

1. protéger contre l'effet abrasif du sablage au jet de zones critiques ;
2. empêcher l'obstruction des trous de petite taille pour maintenir l'écoulement d'air total de la pièce ;
3. prévenir le dépôt indésirable de métal (la couche métallisante a une très grande adhérence sur le métal nu).

Bien que les trous d'effusion ne fassent pas partie du revêtement thermique à proprement parler, ils constituent une composante essentielle à son fonctionnement en formant un film

1. Avec Y = Yttrium, M = Co, Ni ou Co/Ni. Ces revêtements sont couramment appliqués sur les composants de turbine, soit seuls ou comme promoteurs d'adhésion pour la couche de céramique, d'où leur appellation "*bond-coat*".

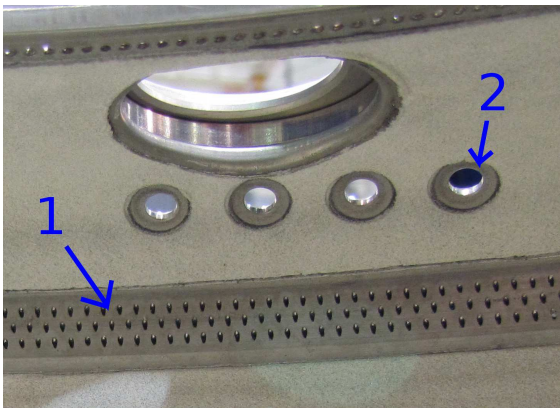
2. Oxyde de zirconium stabilisé à température pièce par l'apport d'oxyde d'yttrium

3. Une configuration de refroidissement regroupe des trous servant à la formation d'un film d'air entre la combustion et la paroi de la pièce, situés dans une section particulière de celle-ci

d'air sur la paroi interne des chambres à combustion. Ils sont percés au laser à angle pour créer un écoulement tangentiel à la paroi. Disposés en rangées (figure 1.2(a)), leur diamètre est typiquement de 1.1 mm (0.045 po) et l'espacement entre chaque trou varie de 2.3 à 2.8 mm (0.090 à 0.110 po). On peut en trouver jusqu'à 400 par rangée, selon le diamètre de la pièce, pour un total allant jusqu'à 10 000 trous par pièce.

Les trous de dilution ont un diamètre supérieur aux trous d'effusion et servent à alimenter la combustion en air frais en provenance du diffuseur⁴. Leur diamètre peut varier de 3.2 mm (0.125 po) à 12.5 mm (0.5 po).

Certaines zones fonctionnelles doivent être préservées pour des étapes de soudure ultérieures (figure 1.2(b)). Il en va de même pour les bordures servant à l'assemblage, qui doivent donc également être masquées adéquatement.



(a) Trous d'effusion (1) et de dilution (2)



(b) Bande réservée pour une soudure ultérieure

FIGURE 1.2 Configurations typiques à protéger du revêtement au plasma

Plusieurs pièces sont constituées de métal en feuille pour lesquelles la tolérance de profil peut atteindre ± 1.5 mm (0.060 po). Afin que le masque soit efficace, il doit épouser complètement la surface sur laquelle il est appliqué. Autrement, des grains d'oxyde d'aluminium peuvent s'incruster lors du sablage au jet. Le métal vaporisé en fines gouttelettes peut aussi se déposer sous le masque lors de la déposition par plasma. Pour éviter ces problèmes, le masque doit être suffisamment souple et adhérent pour former un joint étanche.

4. Composant d'une turbine à gaz servant à réduire la vitesse des gaz sortant des étages de compresseurs et à augmenter sa pression

1.2 Procédé actuel de masquage

1.2.1 Vue d'ensemble

Le masquage des pièces est une étape essentielle dans la boucle du procédé de revêtement par plasma dans son ensemble. Comme l'indique la figure 1.3, la solution retenue aura un impact direct sur les méthodes de démasquage et d'ébavurage subséquentes à la déposition par plasma. Ces étapes furent prises en compte dans le plan de validation du nouveau procédé.

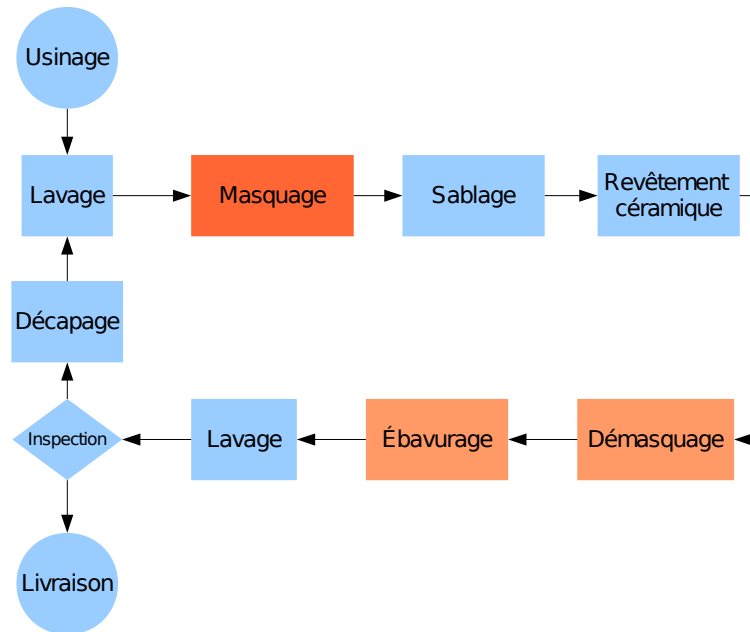


FIGURE 1.3 Schéma du processus de revêtement au plasma

1.2.2 Méthodes et outillage

Le principal masque utilisé est le ruban adhésif renforcé de fibre de verre (figure 1.4). Sa température de service maximale est de 250°C (450°F). L'application se fait en séparant le ruban d'une pellicule gaufrée jaune. Le ruban doit être découpé au moyen de divers couteaux et lames afin d'obtenir les dimensions requises.

Les trous de grande dimension (≥ 4 mm) sont protégés au moyen de bouchons à usages multiples. Il y a deux principaux types de bouchons utilisés : les bouchons composites et les bouchons de silicone (figure 1.5). Les bouchons composites sont constitués d'une rondelle de silicone percée au centre. Un boulon y est inséré pour pouvoir compresser l'anneau flexible une fois inséré, qui prend alors de l'expansion et scelle le passage. Ces bouchons ont une plus grande durée de vie, car l'anneau peut être remplacé au besoin et est protégé par un disque

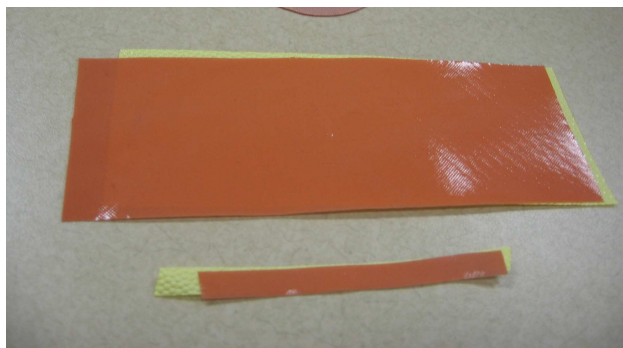
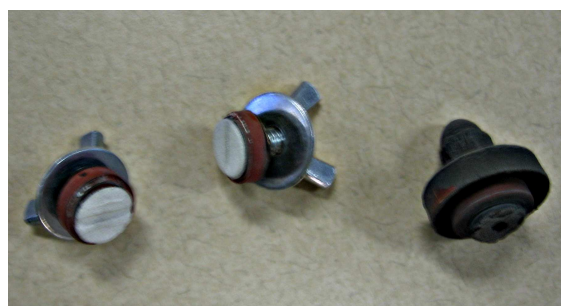


FIGURE 1.4 Deux largeurs typiques de ruban adhésif

métallique qui agit comme bouclier. Les bouchons entièrement faits de silicone sont utilisés pour les trous de plus petits diamètres, pour lesquels les bouchons composites ne sont pas appropriés. Leur durée de vie est limitée à environ 10 usages.



(a) Bouchons de silicone



(b) Bouchons composites

FIGURE 1.5 Deux catégories de bouchons utilisés pour protéger les trous de grandes tailles

Les couvercles et masques rigides peuvent être faits de cuivre, d'aluminium, de nickel ou de plastique (figure 1.6). Afin d'éviter que la céramique n'adhère à l'outillage, une couche protectrice de nitrate de bore est appliquée manuellement et entretenue au fil des nettoyages. Les masques rigides sont utilisés pour protéger de grands pans de la pièce des effets indirects du plasma (poussière, contamination), mais ne sont pas généralement exposés directement au plasma.



FIGURE 1.6 Masques rigides pour la protection indirecte

Tolérances d'application

La procédé de plasma permet une zone de transition, entre les zones recouvertes de céramique et celle où il ne peut pas y en avoir (figure 1.7). À l'intérieur de cette zone, le recouvrement peut être incomplet et l'inspection n'est pas requise. Cette zone a typiquement 2.54 mm (0.100 po) de largeur.

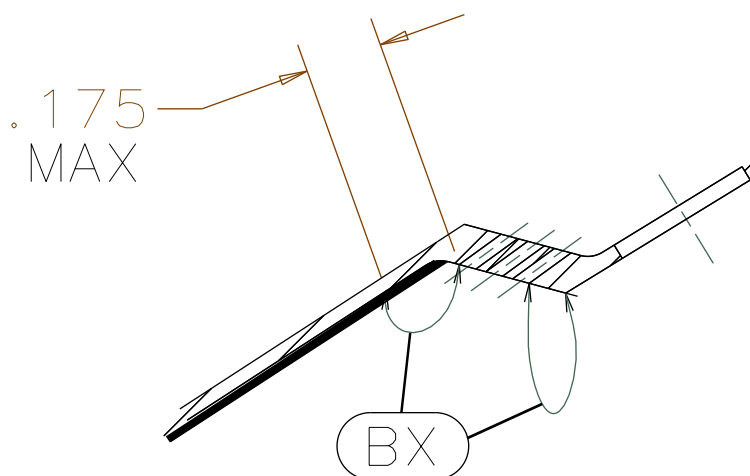


FIGURE 1.7 Zone de transition typique identifiée BX et zone masquée indiquée en gras

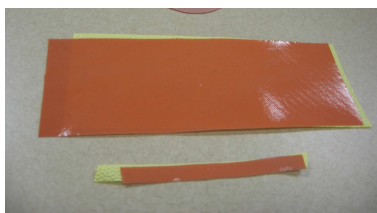
Savoir-faire des opérateurs

Le masquage par ruban adhésif est une opération entièrement manuelle et le savoir-faire des opérateurs est à prendre en compte pour l'élaboration de la solution finale. Après plusieurs années d'expériences, les opérateurs développent leurs propres techniques, qu'ils choisissent d'appliquer en fonction de la pièce entre leurs mains, des outils disponibles (figure 1.8), ou simplement de leur application au travail. Bien qu'elles aient une raison pratique d'exister, toutes ces méthodes ne sont inscrites explicitement nulle part, ce qui crée une inconsistency du revêtement obtenu. Voici quelques exemples de ces techniques usuelles :

- coupures longitudinales pour minimiser l'impact d'une bande qui décollerait par la chaleur ;
- évacuer les bulles d'air au moyen d'une spatule afin de maximiser l'adhérence ;
- utiliser la courbure de la pièce pour découper des sections de ruban en arcs de cercle plutôt que de l'étirer.

Ces méthodes existent pour palier aux défauts intrinsèques du ruban de masquage, soit :

- il ne peut être étiré même si la pièce est très courbée. La tension résiduelle le ferait décoller durant le revêtement ;
- il ne doit y avoir aucune poche d'air emprisonnée sous le ruban, au risque de voir le ruban décoller ;
- le ruban doit être appliqué par bandes d'une longueur maximale de 5 cm, car il se contracte lorsqu'exposé à la chaleur.



(a) Ruban adhésif



(b) Lames jetables



(c) Pâte durcie au four (MacBloc)



(d) Bouchons en silicone



(e) Couvercle semi-rigide



(f) Emporte-pièce

FIGURE 1.8 Divers outils utilisés pour le masquage manuel

1.2.3 Synthèse des géométries à masquer

En observant les différentes pièces masquées, il est possible d'identifier des sous-ensembles de géométries réalisées avec le ruban et de les catégoriser (figure 1.9). À celles-ci, il faut ajouter les bouchons et les couvercles rigides réutilisables. Ces éléments ont cependant été exclus de ce travail car étant des étapes rapides à exécuter et peu propices à générer des défauts. Les géométries de révolution sont celles qui consomment le plus de temps (plus de 20 minutes par bande, 10 bandes en moyenne par pièce). Ces configurations engendrent aussi le plus de problèmes de santé et sécurité puisque les opérateurs ont les bras recourbés à l'intérieur de la pièce et développent des tendinites. La priorité de développement a donc été l'automatisation des surfaces de révolution (rangées de trous d'effusion et bordures de pièces).

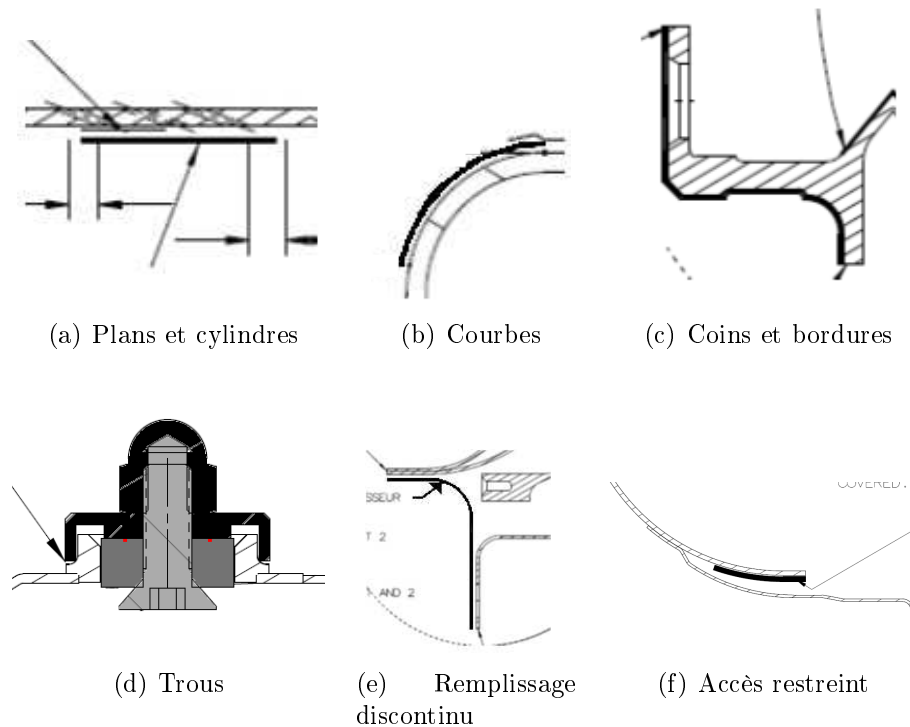


FIGURE 1.9 Sous-ensembles de géométries à masquer

1.3 Proposition d'une nouvelle méthode

1.3.1 Solutions alternatives au ruban de masquage

Il est possible d'effectuer de la déposition au plasma sans utiliser de ruban adhésif. De telles méthodes existent dans l'industrie :

Protection des trous individuellement : certaines compagnies comme Alstom par exemple injectent un masque dans chaque trou individuellement (STANKOWSKI, BOGLI et FERNIHOUGH, 2006), ce qui réduit le volume de masque requis (FERNIHOUGH, BEECK et BOGLI, 2001). Cette méthode est applicable à des pièces de petite taille présentant un nombre limité de trous de refroidissement. Le nombre de trous présents sur certaines pièces chez P&WC rendrait l'injection directe très complexe et prendrait trop de temps.

Nettoyage des trous après application du plasma : on peut procéder au revêtement céramique sans appliquer de masque. Les trous d'effusion sont alors obstrués et doivent être débouchés par la suite, au moyen d'un jet d'eau abrasif par exemple (CAMM, 1999). Les trous peuvent aussi être débouchés par écoulement forcé d'une pâte abrasive (brevet US 5,702,288) ou *abrasive flow machining* (AFM), mais la section des trous se voit agrandie par cette méthode. Les trous partiellement obstrués peuvent être reperçés au laser (brevets US 6,380,512 et US 7,329,832B2), mais ceci implique la connaissance exacte de la position des trous au moyen d'un système de mesure précis ainsi que la prise en compte de toute déformation de la pièce durant le plasma ou le service de la pièce. Il y a également un risque que le laser traverse le trou et endommage la prochaine paroi dans la ligne de tir du laser.

Ajustement des dimensions nominales des trous : il a également été proposé de percer des trous de diamètre initialement plus grand que la dimension requise, pour qu'une fois la couche de céramique déposée le trou ait le bon diamètre et procure un écoulement d'air adéquat. Cependant, cette méthode ne garanti pas le dégagement des trous de refroidissement qui peuvent s'obstruer après un dépôt d'une couche épaisse de céramique (FARMER et FEHRENBACH, 2003).

1.3.2 Types de masques applicables chez P&WC

La problématique du masquage a déjà été abordée dans le passé chez P&WC. Cependant, aucun effort concerté n'a permis de déboucher à une réelle amélioration du procédé en place. Les développements qui ont été accomplis concernent plutôt l'introduction d'outils spécialisés

pour faciliter l'application du ruban par l'opérateur (gabarits, poinçons, emporte-pièces, etc). Ces outils simplifient l'application manuelle mais ne réduisent pas considérablement l'ampleur du travail à accomplir. Il fallait donc repenser complètement les façons de faire.

Application robotisée du ruban adhésif

Des discussions préliminaires avec l'industriel MAG-IAS ont permis d'étudier leurs produits en détail. Cette entreprise fabrique des applicateurs de fibres pour le tressage de pièces complexes en matériau composite. La grande taille de ces outils rendait cependant leur utilisation impossible pour les pièces fabriquées chez P&WC. Un applicateur compliant aurait pu être conçu (figure 1.10). Des mécanismes de type *bed of pins* (MALLOY, 1987) seraient utilisés pour assurer un contact constant avec la surface lors de l'application. La conception d'un tel outil aurait été inspirée de machines existantes (HAILEY et ALDEN, 1987), mais avec des adaptations majeures. Les fonctions d'un tel effecteur comprendraient entre autres :

- alimentation et guidage du ruban de la cassette au point d'application ;
- alignement du ruban sur la surface (position et angle d'attaque) ;
- application sur la surface avec force d'appui contrôlée, soit passivement, soit par contrôle en force ;
- découpe du ruban à la fin de la bande ;
- extraction du papier gaufré à l'endos du ruban à l'extérieur de la pièce.

Cette solution n'a pas été choisie pour l'automatisation car elle rendait l'application trop complexe comparativement à la résine durcie aux rayons UV. Aussi, aucun partenaire industriel ou fournisseur n'a été identifié pour supporter une telle solution sur mesure. Ce critère est très important pour une entreprise comme Pratt & Whitney Canada. Aucun prototype n'a été fabriqué malgré les nombreuses esquisses générées.

Masques rigides évolués

Des travaux préliminaires effectuée au CNRC à Boucherville ont démontré qu'une couche d'aluminium anodisé déposée par plaquage électrolytique procure des propriétés très intéressantes au substrat métallique. Lors d'une déposition par plasma, le revêtement thermique se délamine suite au refroidissement de la pièce (figure 1.11). De tels matériaux pourraient alors servir à la fabrication de masques rigides évolués pour lesquels la maintenance serait réduite. Ils auraient également l'avantage d'être réutilisables de façon virtuellement infinie, puisque que le revêtement protecteur pourrait être "rechargé" lorsque nécessaire. Cette méthode n'est cependant pas applicable à l'ensemble des géométries à protéger puisqu'elle n'assure pas une

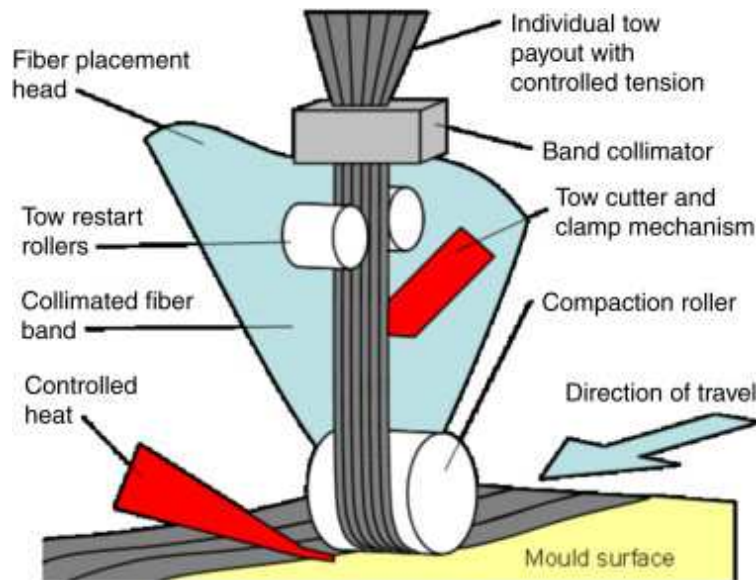


FIGURE 1.10 Exemple d'applicateur de fibres pour la fabrication de composites (DEBOUT, CHANAL et DUC, 2011)

protection étanche sur une pièce dont le profil varie substantiellement comme les chambres à combustion.



FIGURE 1.11 Délamination d'un dépôt de TBC sur un substrat d'aluminium anodisé

Masques souples

Des masques souples sont déjà utilisés chez P&WC, mais leurs formes sont relativement simples et leur usage pourrait être étendu à plus de géométries. Cependant, ils ne peuvent pas protéger les zones d'exposition primaires et donc à eux seuls ne peuvent pas remplacer le ruban adhésif.

Mastic de marque MacBloc

Il s'agit d'une pâte maléable de couleur grise utilisée pour boucher des cavités ou des géométries difficiles à couvrir efficacement avec le ruban à masquer. Cette pâte doit être durcie dans un four à 100°C (230°F) durant 30 minutes. Le retrait se fait manuellement au moyen des outils d'ébavurage conventionnels, tels que des crochets et des lames.

Résines durcies aux rayons UV

Ce polymère est essentiellement un assemblage de 4 composantes :

1. oligomère qui assure la résistance à hautes températures et procure la dureté du masque ;
2. élastomère qui confère l'élasticité au masque ;
3. promoteur d'adhésion ;
4. photo-initiateur, présent à quelques %, qui permet le durcissement une fois exposé aux rayons UV.

Il s'agit de la solution retenue et elle est amplement détaillée aux chapitres 2 et 3.

1.3.3 Solution retenue

Selon le contexte de revêtement au plasma choisi, les besoins en masquage changent considérablement. Les activités de plasma au plan 1 sont axées sur la production de chambres à combustion neuves, tandis qu'au centre de réparations on effectue des rechargements métalliques de toutes sortes (le TBC n'étant qu'un revêtement parmi tant d'autres). Les pièces à aborder ont été choisies en fonction du temps et du volume de production prévus. Ces deux paramètres ont été multipliés afin de choisir les quatre pièces les plus critiques en heures totales.

La méthode de masquage principale retenue est la résine durcie par rayons UV. La validation de ce choix, de l'application jusqu'au retrait est détaillée dans le chapitre 2. L'automatisation du procédé d'application est présentée au chapitre 3.

Chapitre 2

Validation du nouveau procédé

2.1 Tests d'endurance préliminaires sur la résine

En vue de déterminer lequel des produits offerts sur le marché répondait le mieux à nos critères, plus de 12 résines distinctes ont été évaluées. Les premiers échantillons produits manuellement ont tous été non-concluants. N'étant pas refroidis durant la projection par plasma, ils se sont tous dégradés à divers degrés (figure 2.1). D'autres résultats ont montré par la suite qu'il est possible de refroidir suffisamment la résine pour prévenir qu'elle se consume (figure 2.2).

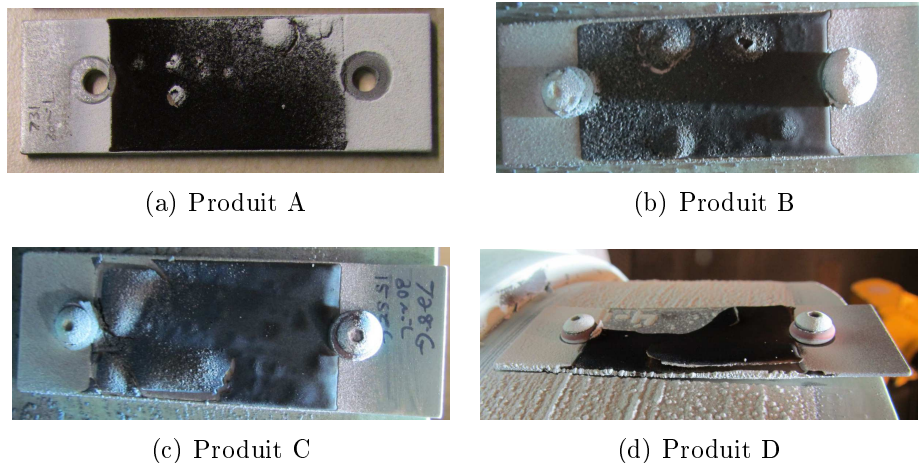


FIGURE 2.1 Divers masques exposés sans refroidissement

L'aminçissement dû au sablage a tout de même été mesuré pour identifier quels produits résistaient le mieux au sablage au jet. Pour ce faire, l'épaisseur des échantillons a été mesurée avant et après le sablage, au moyen d'un micromètre (figure 2.3). Cette information est importante pour la détermination des paramètres d'application de la résine. Il faut prévoir une surépaisseur de 127 à 254 μm (0.005 à 0.010 po) afin d'obtenir une épaisseur résiduelle adéquate durant la projection par plasma.

La principale conclusion à tirer de ces premières expériences est que le refroidissement est primordial à la tenue du masque. C'est pourquoi la section 2.2 s'attarde en détail aux

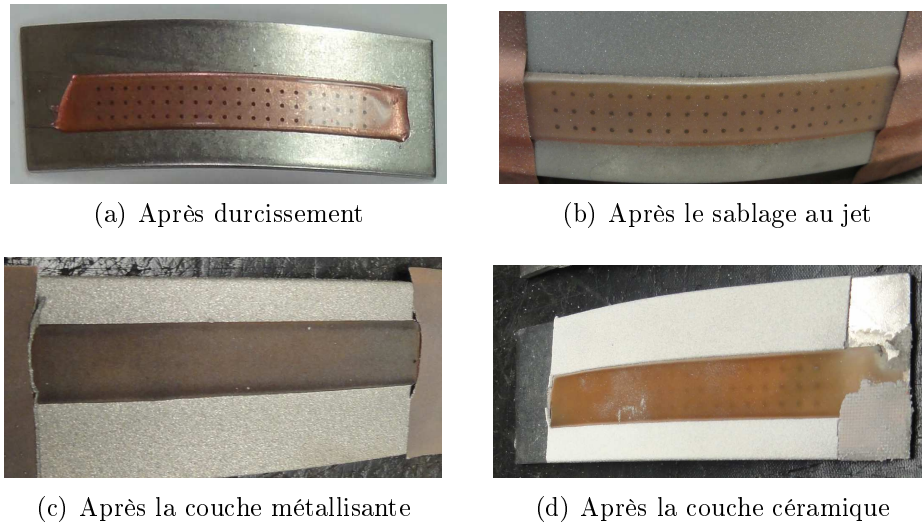


FIGURE 2.2 Échantillons à diverses étapes du processus avec refroidissement

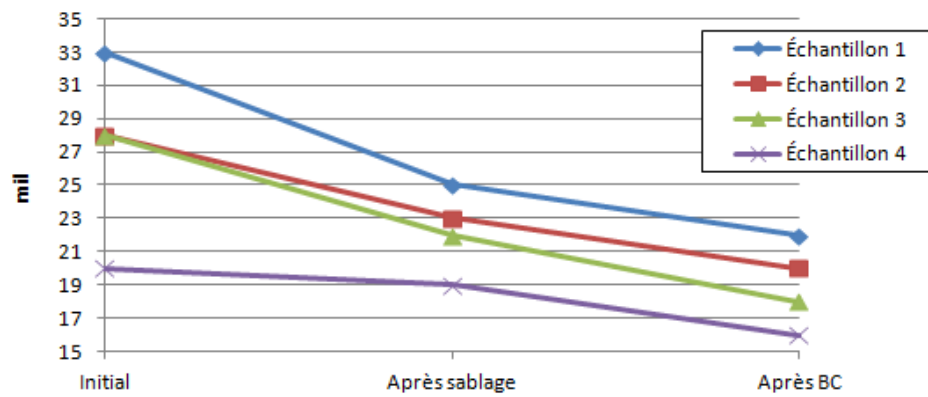


FIGURE 2.3 Amincissement graduel de la résine au cours du procédé

températures auxquelles les pièces sont exposées durant la déposition par plasma et ses conséquences sur la résistance du masque.

2.2 Mesures des conditions thermiques

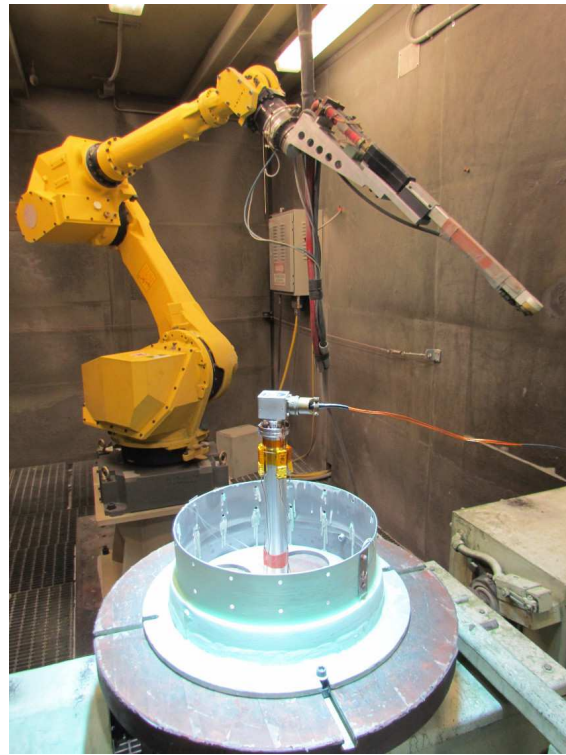
Afin de pouvoir caractériser les conditions thermiques réelles durant la déposition par plasma, il faut utiliser un instrument de mesure non-interférant avec le procédé de déposition et qui offre une précision suffisamment élevée pour observer les fluctuations de température à divers endroits sur les pièces et dans le temps.

2.2.1 Thermocouples avec collecteur tournant

La mesure par thermocouples a été retenue pour la précision qu'elle offre ainsi que sa simplicité d'implémentation avec les équipements disponibles chez P&WC. Des thermocouples soudés aux endroits de la déposition et un contacteur à balais permet la transmission des signaux lorsque la pièce est en rotation (figure 2.4(a)). Le collecteur tournant est positionné en retrait de la pièce afin de protéger les connections électriques de la flamme durant le revêtement. Le poteau porteur est vissé au centre de la fixture ou de la pièce à analyser (figure 2.4(b)). Les fils sont connectés au système d'acquisition situé à l'extérieur de la cellule pour protéger l'équipement.



(a) Équipement expérimental fabriqué



(b) Montage sur une pièce dans la cellule de plasma

FIGURE 2.4 Mesure de la température sur les chambres à combustion

Première série de mesures

La procédure de qualification journalière des machines de projection au plasma a été utilisée pour effectuer des mesures. Une série de mesures a été effectuée sans refroidissement, puis une seconde a été faite avec un refroidissement appliqué au moyen de trois buses pointant vers la pièce (figure 2.5) et projetant l'air à 1.38 bar (20 psi).

La figure 2.6 montre les températures maximales mesurées durant les 24 cycles d'application de la céramique. Bien que la norme CPW385 stipule que la pièce ne doit pas dépasser une température 260°C (500°F), le métal a atteint 401°C (754°F) durant le revêtement sans refroidissement. Avec une simple projection d'air sur la pièce, on obtient une chute de la température maximale de 151°C (263°F) en valeur absolue, soit une baisse de 35%. Avec le refroidissement, la moyenne de température se situait à 227°C (441°F) et oscillait avec une amplitude de 25°C. Il est important de noter que l'amplitude de l'oscillation interpanse demeure la même. C'est plutôt la température moyenne qui décroît.

La figure 2.7 démontre que les températures sont uniformes, soit à l'envers ou à l'endos des plaquettes, avec ou sans céramique. Les thermocouples 1 et 3 correspondent aux faces exposées à la flamme, tandis que les thermocouples 2 et 4 étaient localisés sur la face opposée. Ceci semble mitiger l'effet isolant de la céramique durant sa déposition. La poudre est très chaude lorsqu'elle frappe la surface de la pièce, à travers laquelle elle dissipe son énergie thermique et cinétique. Ce point sera validé en mesurant les températures sur une vraie pièce.

Les oscillations principales qui sont observées sont causées par les mouvements de va-et-vient du robot lorsqu'il approche et quitte la pièce jusqu'à son point de repos (figure 2.6). Ce test a démontré plusieurs choses :

1. Les tests initiaux ont été réalisés dans des conditions thermiques beaucoup trop agressives pour les résines de masquage. Il faut donc relativiser l'ensemble des résultats obtenus sans refroidissement, bien que la résine retenue ait eu de bonnes propriétés à hautes températures.
2. Il est possible de réduire considérablement la température du substrat au moyen de buses de refroidissement pointées vers la pièce. La méthode utilisée étant non-optimale, on peut s'attendre à ce que de meilleurs refroidissements puissent être obtenus.
3. Il n'y a pas de différence significative de température entre les faces avant et arrière des pièces, le métal conduisant efficacement la chaleur étant donné un si haut gradient de température. Il en va de même pour les faces revêtues de céramiques, bien qu'elles aient un coefficient de conduction thermique beaucoup plus faible (SLIFKA et al., 1998). Ceci confirme donc que l'apport en énergie thermique à la pièce est essentiellement dû aux particules de céramique plutôt qu'à la flamme elle-même.
4. La vitesse de montée de la température est très rapide. Pour de longues passes de céramiques, la pièce atteint inévitablement des températures très élevées. L'ajout de pauses de refroidissement entre les passes ou l'intensification des méthodes de refroidissement pour des pièces de grande taille est donc impératif.

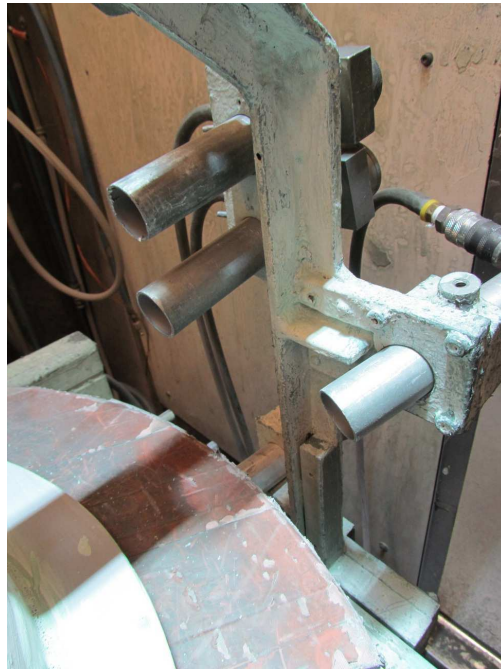


FIGURE 2.5 Système de refroidissement à l'air pour la déposition au plasma

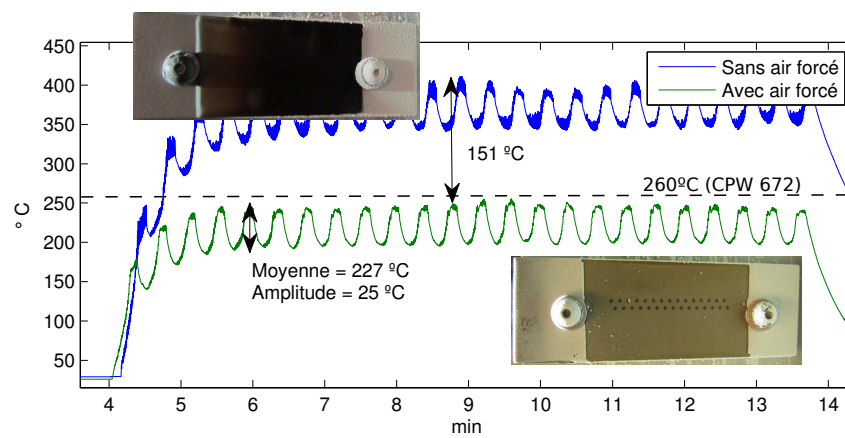


FIGURE 2.6 Impact du refroidissement à l'air sur la température des échantillons

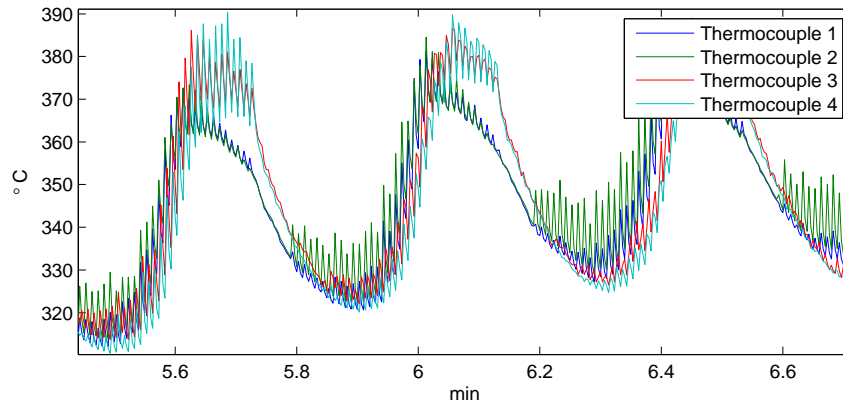


FIGURE 2.7 Comparaison des températures des quatre thermocouples

La mesure des températures sur des échantillons rectangulaires donne une bonne idée des conditions thermiques existant lors de la projection par plasma mais n'est pas représentative d'une vraie pièce. Il sert plutôt à caractériser les limites d'application du produit. Des mesures exhaustives des températures sur une véritable pièce instrumentée permettra de reproduire les conditions réelles et sera l'objet des sections suivantes.

2.2.2 Plaquettes avec une configuration du deuxième type

Des jets d'air directionnels ajustables ont été évalués pour maximiser le refroidissement des pièces. Des tubulures flexibles permettent de diriger les jets d'air pour maximiser le refroidissement (figure 2.8). La figure 2.9 montre des échantillons après le revêtement céramique à 64 mm (2.5 po) avec refroidissement. Les mesures ont été beaucoup plus variées (figure 2.10) que lors des essais précédents. Ceci s'explique par le fait que les thermocouples étaient fixés avec du ruban adhésif sur le disque (figure 2.8). Le ruban a chauffé et s'est étiré durant la procédure, rapprochant certains échantillons de la flamme plus que d'autres.

La température moyenne du substrat se situait à 243°C (469°F). L'amplitude d'oscillation en régime permanent est de 57°C (134°F). Ce test est très important, car il valide l'application de la résine de masquage UV pour l'ensemble des sections intérieures des chambres à combustion, qui sont revêtues sur leur face extérieures et sont donc plus faciles à refroidir. Les sous-composants extérieurs, qui sont revêtus à l'intérieur, devraient être plus chauds, la flamme étant appliquée sur la face intérieure de la pièce. C'est l'objectif de la section suivante.



FIGURE 2.8 Tubes de refroidissement flexibles pour le montage alternatif

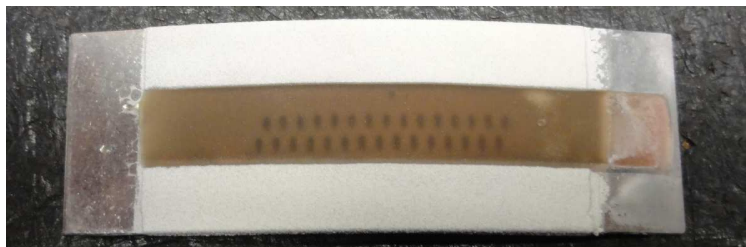


FIGURE 2.9 Résultats dans les conditions expérimentales avec les tubes flexibles

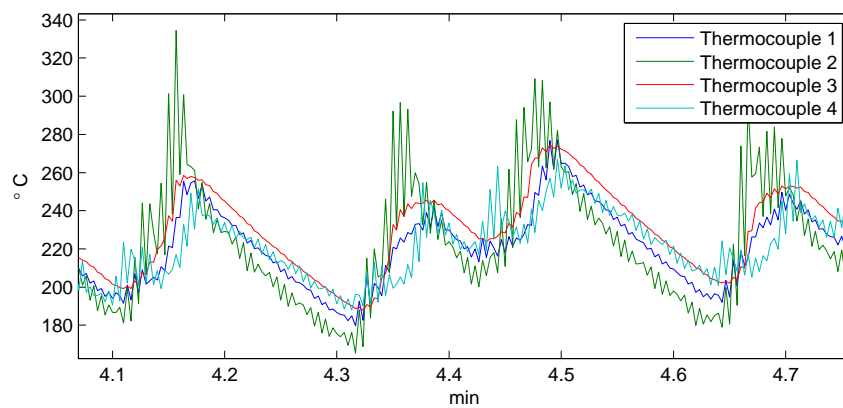


FIGURE 2.10 Variation de température entre les quatre thermocouples

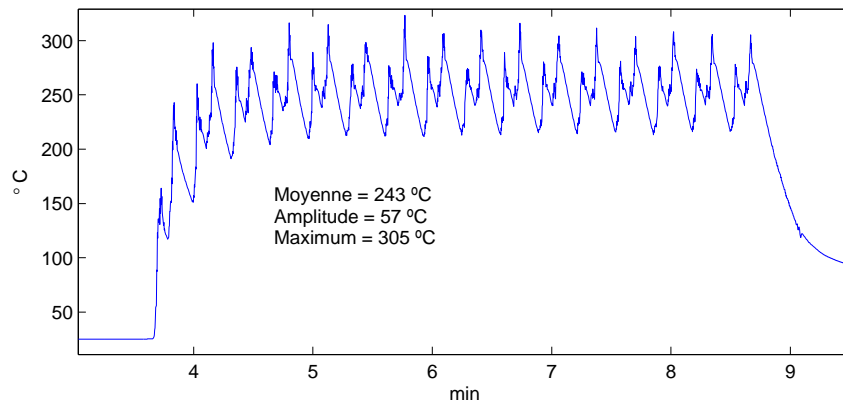


FIGURE 2.11 Température maximale avec refroidissement à 64 mm de distance

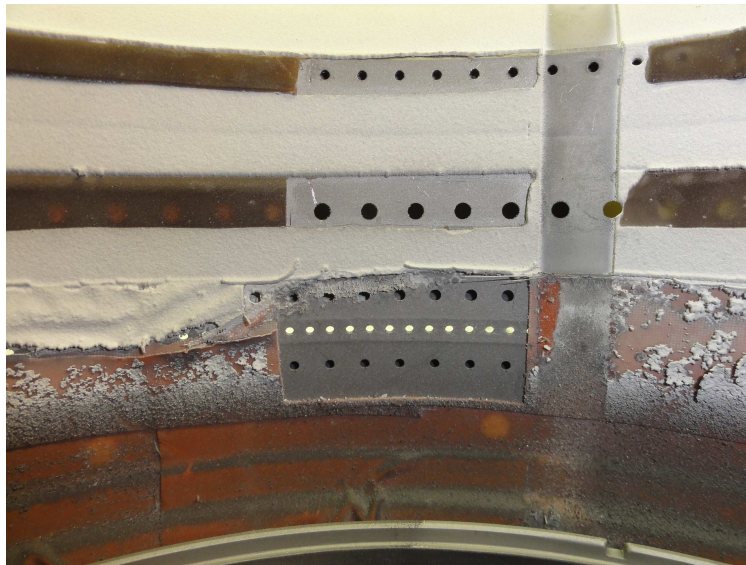


FIGURE 2.12 Masquage sur une petite section extérieure de chambre à combustion

2.2.3 Mesures sur une pièce complexe

L'objectif de cette étape était de caractériser les températures sur une pièce de grande taille et évaluer la capacité de refroidissement pour des géométries partiellement fermées. La face intérieure d'une pièce de grande taille a été instrumentée (figures 2.13 et 2.14(a)) à divers endroits où il y a normalement application du masque. Avec un diamètre extérieur de 508 mm (20 po) et une hauteur de 178 mm (7 po), cette pièce représente une des plus grosses configurations rencontrées et par le fait même est exposée plus longtemps à la flamme. En plus de l'air soufflé sur l'extérieur, un venturi aspire l'air chaud en dehors de la pièce (figure 2.14(b)) pour entraîner de l'air plus frais au centre de la pièce.

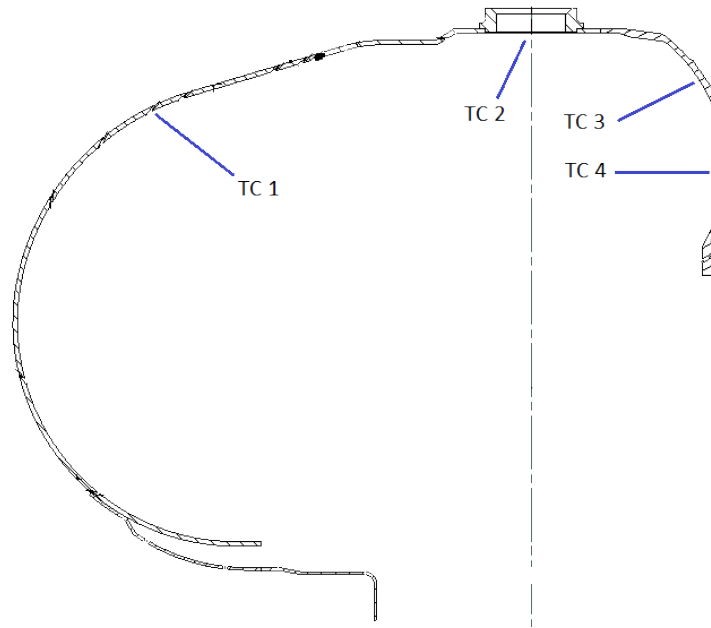
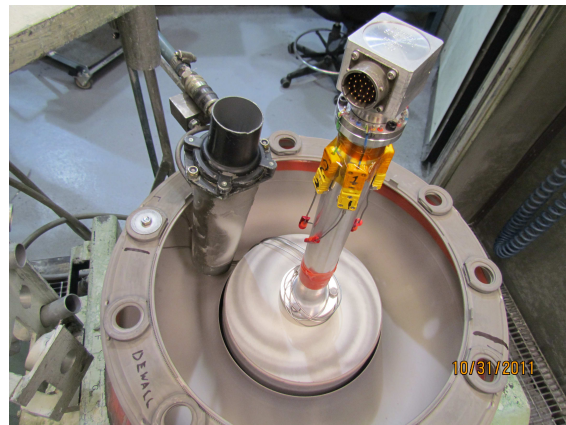


FIGURE 2.13 Disposition des thermocouples sur la face intérieure d'une pièce de grande taille



(a) Thermocouples soudés sur la paroi interne



(b) Venturi d'aspiration pour évacuer la chaleur

FIGURE 2.14 Instrumentation d'une pièce de grande taille

Les températures mesurées sur cette chambre à combustion sont inférieures à celles obtenues sur des géométries plus petites (figures 2.15 et 2.16). Ceci s'explique par le fait que les pièces de grands rayons disposent de plus de temps pour dissiper la chaleur durant leur révolution. La chute de température entre les passes est donc beaucoup plus marquée pour cette configuration (jusqu'à 175°C , figure 2.15).

Une analyse plus poussée des températures obtenues montre qu'il y a deux fréquences d'oscillation. La plus élevée, affectant la température moyenne de la pièce, est liée au temps

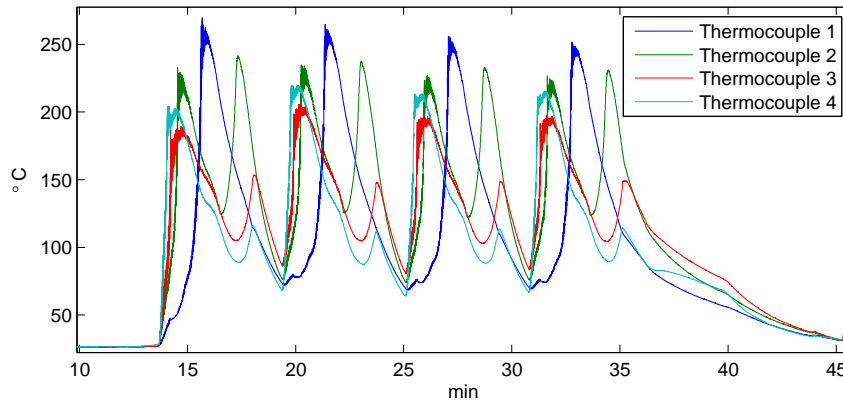


FIGURE 2.15 Amplitude de température due au refroidissement interpasse

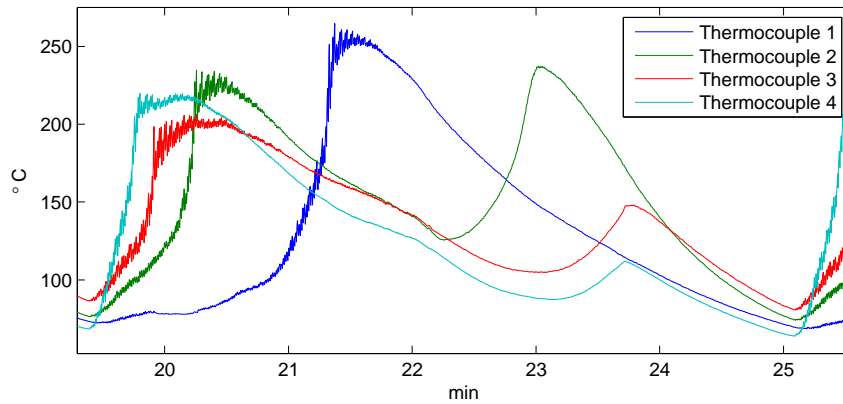


FIGURE 2.16 Température pour les quatre thermocouples durant une seule passe de couche métallisante

inter-passe. Il y a cependant une seconde fréquence beaucoup plus rapide qu'on pourrait assimiler à un bruit de mesure (figure 2.17). Cependant, la période de ce signal correspond exactement à une révolution de la pièce sur l'axe rotatif. Il s'agit donc bien d'une mesure réelle. En une seule révolution (0.6 s), la température oscille de plus de 12 °C (20°F) suite au cycle plasma-refroidissement. Des travaux se sont penchés sur la modélisation et la mesure expérimentale des phénomènes de transferts thermiques observés durant le revêtement par plasma (NYLEN et al., 1998). Il faut porter attention au rapport des fréquences d'échantillonnage f_e et du signal f :

$$R = \frac{f_e}{f} = 3, \text{ avec } f_e = 5Hz \text{ et } f = 1.6Hz \quad (2.1)$$

Puisque $R \geq 2$ on peut conclure, selon le théorème de Shannon (SHANNON, 1949), que la fréquence du signal mesuré est fidèle.

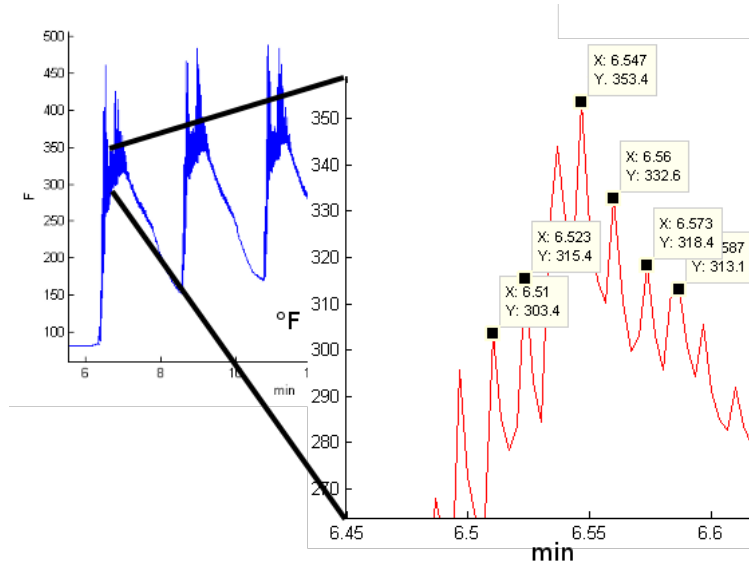
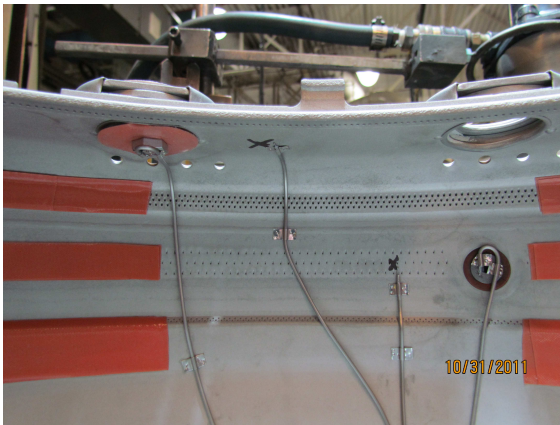


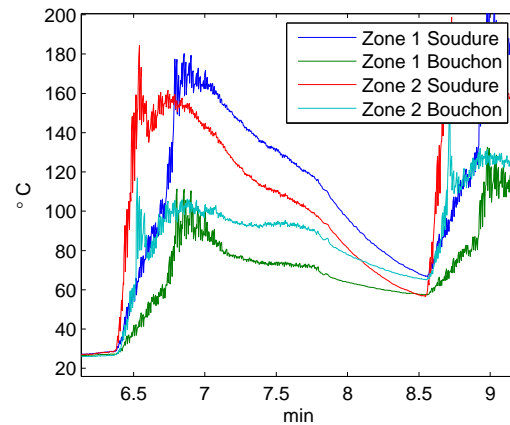
FIGURE 2.17 Contribution de la révolution de la pièce à la température mesurée

Les gros orifices (pour les injecteurs ou les allumeurs par exemple) sont protégés au moyen de bouchons constitués d'un assemblage d'un boulon et d'un disque de silicone (voir section 1.2.2). Afin de savoir s'il est possible de mesurer la température des pièces avec des bouchons instrumentés, des thermocouples ont été soudés à deux types de bouchons (figure 2.18). La figure 2.18(b) indique qu'il y a une forte isolation thermique entre les bouchons et la pièce (près de 50% de la température réelle). Ce moyen d'instrumentation non-invasif des pièces s'est montré inefficace. Pour obtenir des mesures plus proches de la réalité, il faudrait concevoir des bouchons conducteurs spécifiques à cet usage.

Toutes ces mesures démontrent l'importance primordiale d'avoir un dispositif adéquat pour refroidir des pièces. Un contrôle de la température du métal a un impact direct sur la durée de vie du masque durant le revêtement au plasma ainsi que sur l'intégrité de la céramique obtenue, tel que discuté dans la section suivante.



(a) Bouchons instrumentés



(b) Écart entre les températures mesurées sur les bouchons et sur la pièce

FIGURE 2.18 Instrumentation de bouchons pour des mesures non-invasives

2.3 Analyse microscopique de l'interface TBC/métal

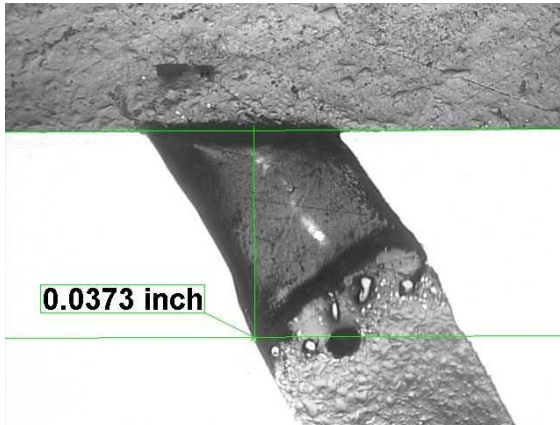
Des échantillons à diverses étapes du procédé ont été coupés puis encapsulés sous vide dans des moules d'époxy. Les surfaces à observer ont été polies puis photographiées au microscope.

2.3.1 Observations sur les deux méthodes de masquage

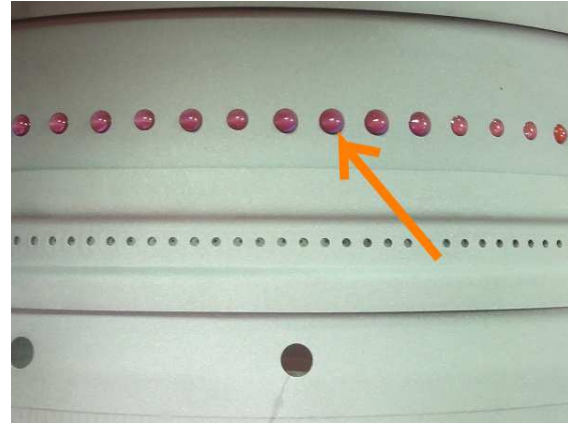
Le ruban adhésif ne pénètre pas dans les trous et n'y laisse pas de résidus lorsqu'on le retire. Par sa nature fluide, la résine coule et s'imisce dans les trous. Plus le trou est grand, plus le produit peut s'incruster profondément (figure 2.3.1). Dans le cas des trous d'effusion, où le diamètre est d'environ 1 mm (0.040 po), on observe une pénétration limitée à 0.9 mm (0.035 po) et donc de l'ordre du diamètre du trou. Pour des diamètres supérieurs, le produit peut remplir complètement ceux-ci, comme à la figure 2.19(b).

2.3.2 Interaction entre le masque et le dépôt par plasma

La résine durcie n'interagit pas avec le revêtement. Celui-ci n'adhère donc pas à la résine, tandis que la couche métallisante (BC) a pour propriété néfaste d'adhérer au ruban adhésif conventionnel (figure 2.20). Ceci engendre des bavures en forme de congères (figures 2.21(a) et 2.22) qui doivent être retirées ultérieurement par un ébavurage manuel. On peut également observer un amincissement du ruban par endroits lorsqu'il est exposé à la flamme de façon trop intense (figure 2.21(b)). Puisqu'une dégradation thermique du ruban risque d'exposer la



(a) Trous d'effusion



(b) Trous de dilution

FIGURE 2.19 Pénétration de la résine dans des trous de diamètres variés

surface, ce phénomène est retardé en pratique par l'ajout préventif d'une seconde épaisseur de ruban.



(a) Frisettes en bordure du ruban



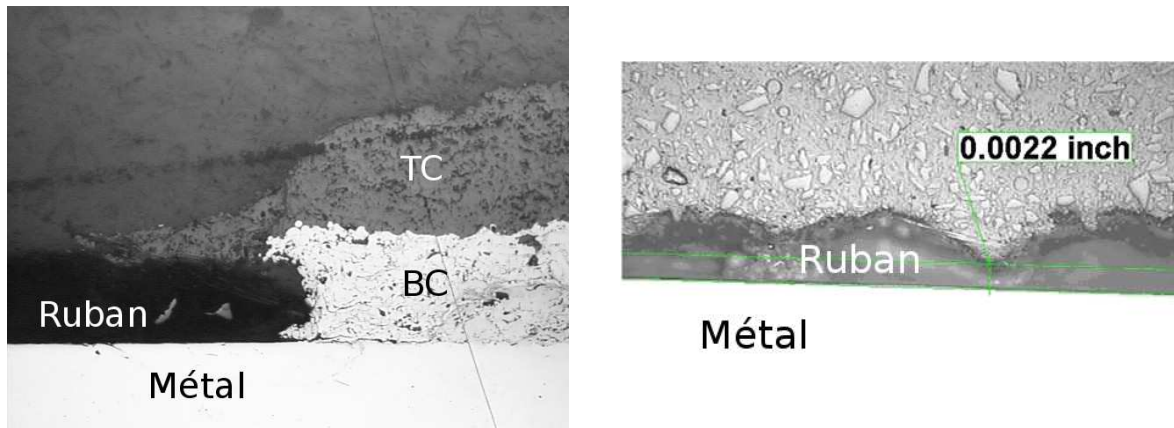
(b) Écailllements

FIGURE 2.20 Accumulation de poudre sur le ruban

2.3.3 Impacts sur la qualité

La première observation concerne la contamination de la céramique. Dans la figure 2.22, on observe que la résine ne contamine pas la céramique durant l'application. La démarcation est nette et la céramique présente un faciès¹ homogène jusqu'à la bordure du revêtement (fi-

1. Du latin qui signifie "aspect" : est un terme général qui est employé en métallurgie ou en minéralogie. Il a un intérêt descriptif et sert à qualifier un étage lithostratigraphique, ou dans le cas présent la coupe



(a) Accumulation de céramique sur le ruban

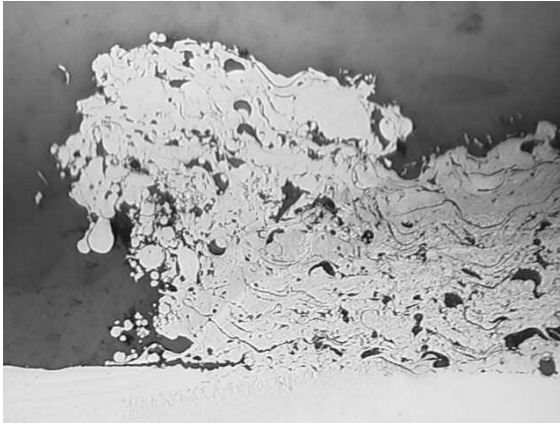
(b) Dégradation locale critique du ruban de masquage (quasi-perforation)

FIGURE 2.21 Interaction du ruban adhésif avec la déposition au plasma

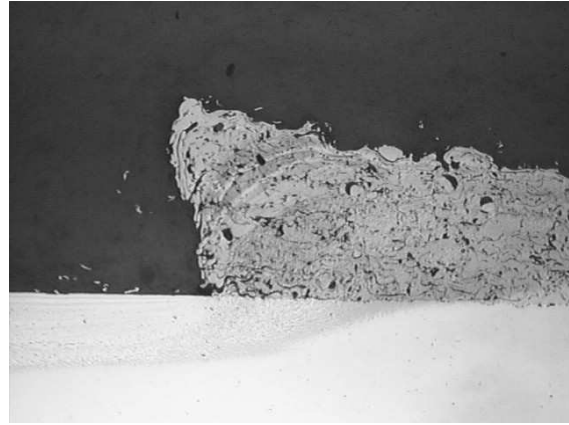
gure 2.22(b)). Dans le cas du ruban, la colle crée des poches d'oxydes lorsqu'elle se dégrade à haute température. Ceci s'observe par l'augmentation de taches sombres dans le revêtement à l'approche de l'interface (figure ??). Toute inclusion d'oxyde est susceptible de réduire la durée de vie en service de la céramique, car l'augmentation de volume liée à l'oxydation engendre une délamination prématurée à l'interface BC/TC (BOSE, 2007). L'état géométrique et métallographique de l'interface céramique/substrat a un rôle capital sur la durée de vie de la céramique en service, puisque c'est à cet endroit que s'amorce la rupture (SEMENOV et al., 2005).

L'étude plus poussée des mécanismes de défaillance en service des revêtements thermiques n'est pas l'objet de ce mémoire. De très bons volumes existent sur le sujet (B. HEIMANN, 2008 ; BOSE, 2007 ; KOKINI, 1993) et le lecteur est invité à les consulter au besoin.

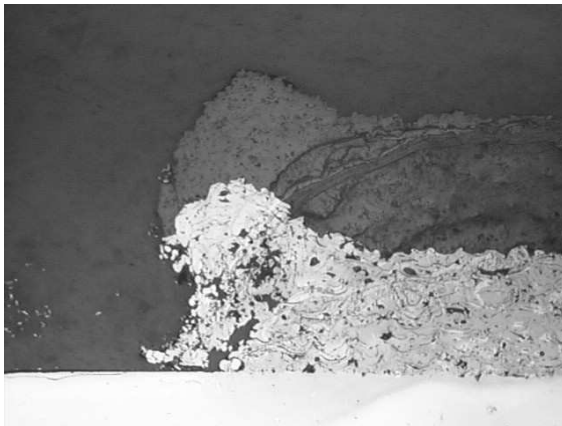
d'une structure artificielle



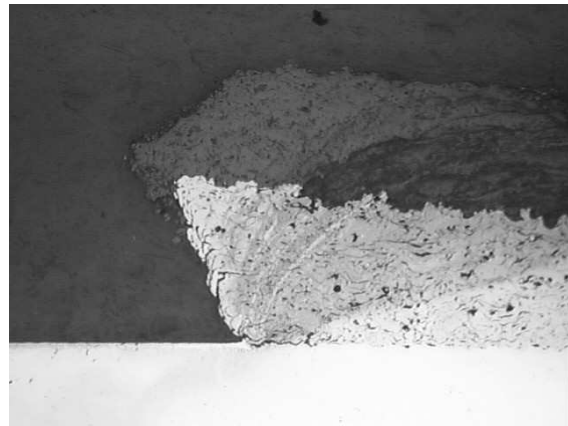
(a) BC avec ruban



(b) BC avec résine



(c) BC+TC avec ruban



(d) BC+TC avec résine

FIGURE 2.22 Intégrité de la céramique à l'interface selon le type de masque employé

2.4 Méthodes d'application du masque

2.4.1 Vaporisation

Un pulvérisateur a été monté sur une machine de type portique cartésien (*gantry*, figure 2.23). Une pression d'atomisation très élevée est requise pour briser un fluide visqueux en fines gouttelettes, mais une pression trop élevée peut engendrer des phénomènes d'écoulement transversal lorsque l'air pousse la résine à l'extérieur de la zone d'application. À l'opposé, une pression d'atomisation trop faible peut générer des filaments (figure 2.24). Les résultats obtenus indiquent qu'à moins de réduire la viscosité des résines de masquage, il faut écarter la vaporisation comme méthode d'application de précision. Cependant, la viscosité de la résine est un atout car elle empêche le masque de couler avant d'être durci sur une surface verticale.

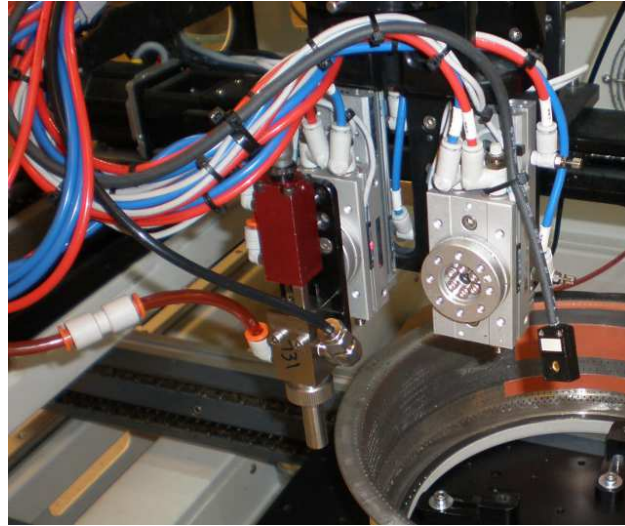
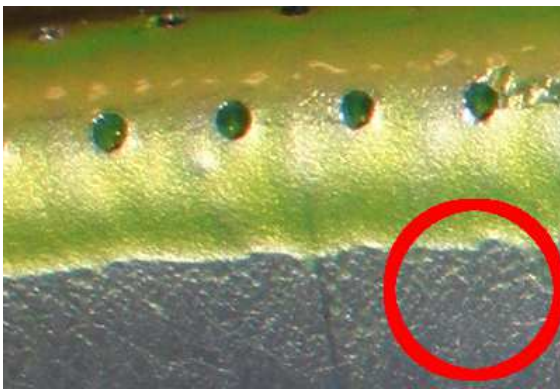
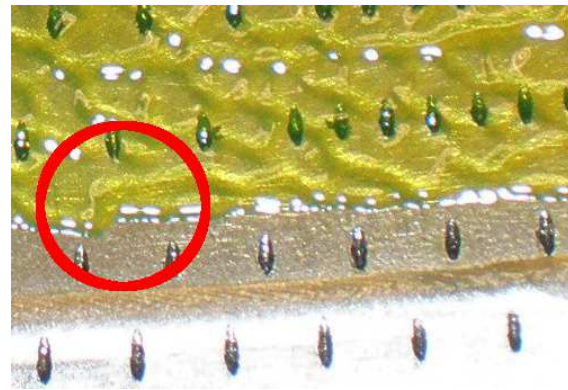


FIGURE 2.23 Atomiseur monté sur une machine 5 axes



(a) Filaments



(b) Vagues (débordements)

FIGURE 2.24 Filaments et débordement observés lors de la vaporisation

2.4.2 Dépôt direct

Le produit peut également être déposé directement sur les pièces, au moyen de buses profilées permettant une application précise et localisée. Cette méthode demande plus de précision quand au positionnement de l'outil par rapport à la pièce. Elle assure par contre une transition nette entre les zones mouillées et les zones sèches, ce qui facilite le respect des tolérances d'application très serrées.

Embouts spécifique à la couverture de surfaces

Divers types d'embouts peuvent être utilisés pour appliquer la résine sur les pièces (figure 2.25). Chaque embout a une utilité propre, selon la géométrie à recouvrir : les embouts ovales pour des sections cylindriques ayant un rayon de courbure, et les pointes pour remplissage local d'aspérités. Les embouts plats de grande taille pourraient être utilisés pour du remplissage de surfaces planes, mais ne sont pas adaptés aux pièces de moteurs qui présentent un haut degré de courbure et peu de surface planes.

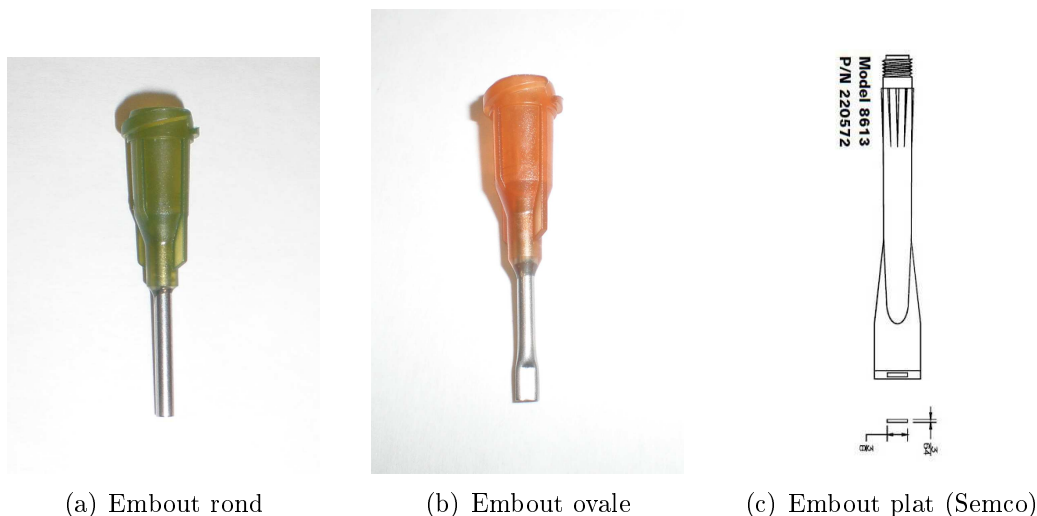


FIGURE 2.25 Exemple d'embouts évalués

2.5 Méthodes de retrait du masque

2.5.1 Incinération du masque

Des tests d'incinération ont été effectués à l'École Polytechnique de Montréal le 23 août 2011. Les plaquettes ont été déposées sur un chariot en céramique avant d'être insérées dans un petit four muni d'un module de contrôle (figure 2.26) avec thermocouple. À partir de 500°C, il y a un dégagement d'odeurs et à partir de 550°C, il y a début du dégagement de fumée. La complète combustion du produit est observée après 5 minutes à 650°C.

À la fin de la combustion, le produit laisse des petites cendres de couleur gris pâle très volatiles, qu'il suffit de souffler pour retirer (figure 2.27). Les échantillons présentent des traces d'oxydation prononcées sur les extrémités (figure 2.28). Ceci pourrait être causé par la proximité des plaquettes avec les briques réfractaires, qui étaient très près des plaquettes



FIGURE 2.26 Four expérimental de traitement thermique

(1 cm). La température à cet endroit a très bien pu excéder les 650°C moyens du four. Les plaquettes présentent à divers niveaux des traces bleues à la surface du métal (figure 2.29). Il peut s'agir de réaction entre le métal et l'atmosphère du four ou bien de traces du produit précipité.

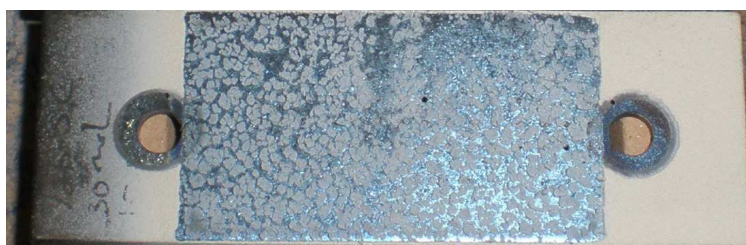


FIGURE 2.27 Résidus de combustion sous forme de cendres

Bien que la combustion semble bien fonctionner pour retirer le produit, les paramètres atmosphériques ainsi que les gradients de température devront être mieux contrôlés pour éviter que l'oxydation observée ne se produise sur les pièces. Cette méthode de retrait présente l'avantage de garantir le retrait complet dans les petits trous d'effusion (figure 2.30).

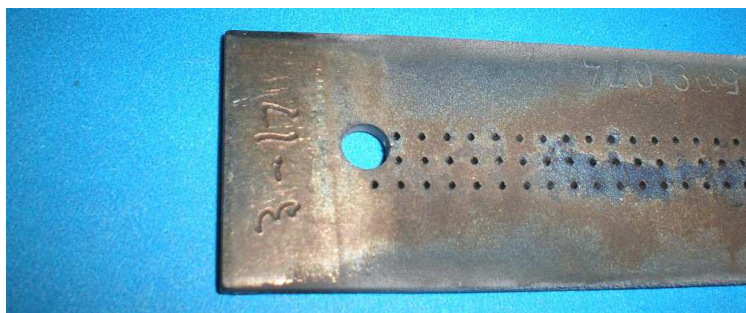


FIGURE 2.28 Oxydation à la surface des échantillons, surtout aux extrémités



FIGURE 2.29 Traces bleues à la surface des échantillons



FIGURE 2.30 Résine incinérée

Considérations techniques liées à l'incinération

Étant appliqué à très haute température, le revêtement accumule des contraintes en tension à l'interface pièce/métal au fur et à mesure qu'il se refroidit. En plus de la déformation thermique, le souffle du jet de particules de céramique déforme plastiquement la pièce (l'ouverture de la pièce peut s'écarter jusqu'à 2 mm). Bien que la température d'incinération de la résine soit inférieure à celle utilisée lors du relâchement de contraintes (plus de 982°C ou 1800°F), il faut maintenir une vitesse de montée et de descente suffisamment lente pour minimiser les déformations.

Limites thermiques du matériau

Les chambres à combustion sont fabriquées à partir de feuilles d'un alliage de nickel hautes performances. Ce métal conserve ses propriétés à très hautes température, une condition obligatoire car celle-ci atteint dans une turbine à gaz 80 % du point de fusion de cet alliage. Selon les spécialistes des chambres à combustion chez Pratt & Whitney Canada, les pièces sont conçues pour ne pas s'oxyder lorsqu'exposées à une température continue de 760°C (1400°F) ou moins.

2.5.2 Trempage dans un bain UCL

Les pièces sont lavées après le plasma dans une solution d'eau savonneuse activée par des ultrasons. Le principe du retrait par trempage est de mouiller la pièce à l'interface masque-substrat. Le liquide aide à briser la liaison adhésive et accélère la délamination mécanique du masque. Il suffit d'immerger la pièce dans les bassins d'eau chaude à 75°C utilisés pour le nettoyage des pièces. Une fois la résine retirée, la pièce est séchée dans un séchoir à air chaud. Il faut s'assurer de retirer la totalité de la résine lorsque cette méthode est utilisée. L'usage d'une force trop élevée risque de briser la résine et de laisser certains trous bouchés tel que vu précédemment. Le masque peut décoller difficilement avant le trempage. Le retrait manuel devient plus aisé une fois la pièce mouillée (figure 2.31). Comme le montre la photo, le masque demeure entier, ne laissant pas de fragments dans les trous.

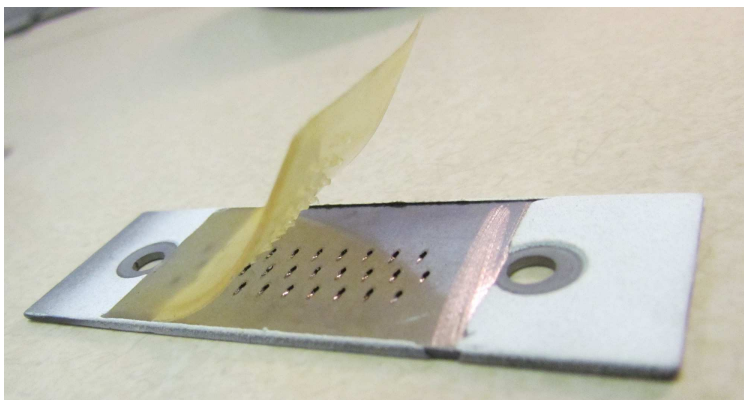


FIGURE 2.31 Délamination après trempage dans l'eau chaude

2.5.3 Jet d'eau abrasif

Un jet d'eau à haute pression (figure 2.32) peut faire décoller le masque du substrat. Le jet d'eau perce d'abord la résine localement. Ensuite, le jet d'eau mouille l'interface

masque/substrat et encourage la séparation de celui-ci. Il suffirait de récupérer les débris du masque après ce processus. Quatre échantillons ont été préparés et l'épaisseur a été contrôlée au moyen d'un capteur à ultrason calibré pour l'alliage de nickel. Les plaquettes ont été exposées à un jet d'eau concentré de 3 mm de diamètre à 550 bar (figure 2.33). Enfin, elles ont été coupées au laboratoire afin de s'assurer que la céramique n'était pas attaquée par le jet d'eau.



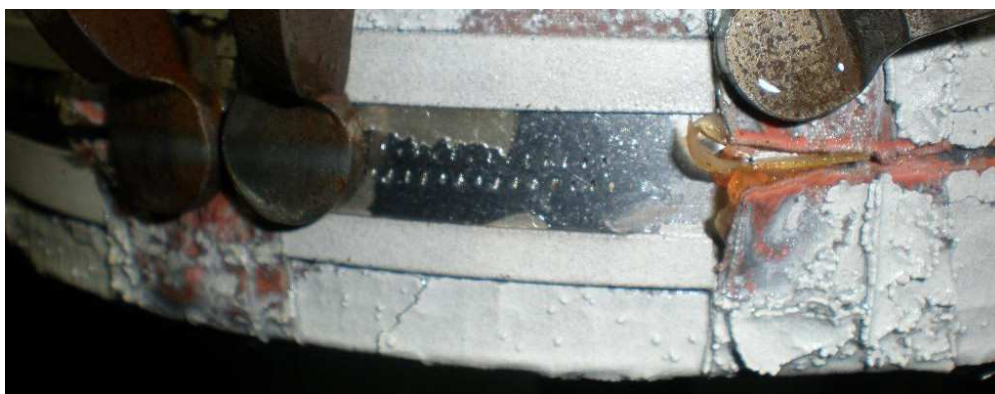
FIGURE 2.32 Buse de 3 mm utilisée

Il a été démontré précédemment qu'il peut rester de la résine à l'intérieur de certains trous d'effusion (figure 2.33(b)) après le démasquage. Pour retirer la résine résiduelle, il serait envisageable d'utiliser un jet d'eau parallèle aux trous sur la face opposée de la pièce, afin d'expulser les particules restantes (figure 2.34). Cette méthode implique cependant un accès direct à la face opposée, ce qui ne sera pas toujours possible en réalité (voir un exemple à la figure 2.35).

Pour des configurations de pièces simples et des bandes larges de résine, un retrait manuel au jet d'eau serait envisageable. Pour des configurations complexes avec des bandes de masque étroites, la précision de la projection du jet d'eau devient critique, au risque d'endommager le revêtement céramique. L'opération pourrait se faire par un robot, mais l'implémentation d'une cellule robotique additionnelle pour le démasquage écarte cette solution pour le moment. Par sa simplicité d'exécution et pour l'accessibilité aux équipements requis, la méthode de retrait mécanique après un mouillage dans l'eau chaude a été retenue pour la suite du développement.



(a) Jet d'eau à haute pression



(b) Décollage de la résine après le processus

FIGURE 2.33 Retrait de la résine au jet d'eau abrasif

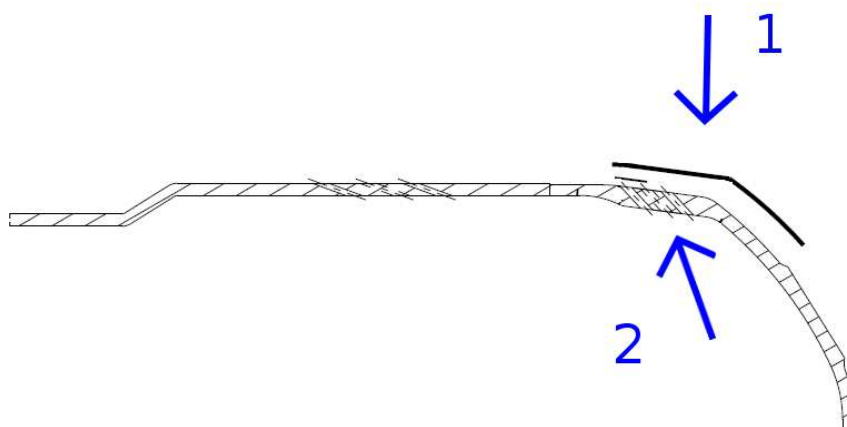


FIGURE 2.34 Nettoyage des trous d'effusion en deux étapes (1) et (2)

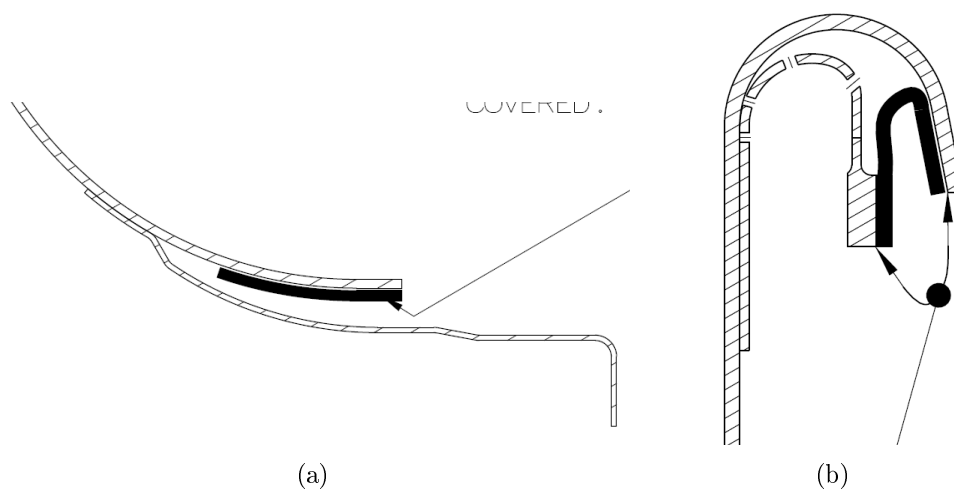


FIGURE 2.35 Configurations typiques où l'accès aux deux faces est limité ou impossible

2.6 Environnement Santé et Sécurité (ESS)

Afin de garantir la sécurité et la santé des travailleurs, toute nouvelle substance chimique admise chez P&WC doit répondre à des critères stricts :

- ne pas contenir d'agent cancérigène ni aucun autre composé chimique banni par la compagnie (tel que le diisocyanate de toluène ou TDI) ;
- détenir une fiche et un numéro de produit propre à P&WC ;
- avoir fait l'objet d'une analyse complète du cycle de vie du produit, de son entrée chez P&WC jusqu'à son élimination ou sa sortie de l'entreprise.

Avant de pouvoir utiliser les résines de masquage en milieu industriel, un suivi très serré a dû être réalisé auprès du fournisseur pour qu'il fournisse toutes les informations demandées par les responsables ESS de P&WC. Ce processus d'analyse du changement a duré plus de 4 mois avant de mener à l'acceptation du produit à l'interne pour fins de tests. Lorsqu'il faudra introduire le nouveau procédé de masquage dans la chaîne de production, une analyse encore plus sévère devra être menée.

Pollution atmosphérique

Puisque la résine risque d'être en partie ou en totalité incinérée en cours d'utilisation ou par la suite, une permission additionnelle doit être obtenue. Le certificat d'émissions atmosphériques émis par le gouvernement du Québec autorise les entreprises à rejeter au plus 15 kg de composés organiques volatiles par jour et par campus. Les conditions suivantes

ont été imposées par le département ESS :

1. avoir un système de captation locale approprié ;
2. recueillir tous les déchets solides dans des contenants identifiés à cette fin ;
3. lors d'une application manuelle, un équipement de protection individuel adéquat doit être porté (gants, lunettes de protection contre les rayons UV) ;
4. le local doit être un espace ventilé.

2.7 Sources des variations

À la lumière des nombreuses analyses présentées dans ce chapitre, il ressort que le principal paramètre à contrôler pour assurer à la fois la résistance du masque et sa facilité de retrait est la température du métal. L'ensemble des autres paramètres critiques au procédé de plasma sont déjà pris en charge par la boucle de contrôle actuelle. Le grand inconnu, une fois le masque caractérisé, est donc la capacité de couvrir efficacement les sections de refroidissement en respectant les tolérances du procédé ainsi qu'en s'adaptant à la multitude de géométries. Les étapes réalisées en vue de relever ce défi sont présentées au chapitre suivant.

Chapitre 3

Modèle de déposition automatisée

L'élaboration d'un modèle prédictif de déposition réduit le temps de programmation de nouvelles pièces en simplifiant un processus long et itératif. Il permet aussi d'estimer avec précision la faisabilité d'une nouvelle opération ainsi que de prévoir son temps d'exécution. Diverses étapes successives ont mené à l'élaboration de ce modèle, en partant de la base pour évoluer vers des concepts de niveaux de complexité croissants.

3.1 Équipement et préparation de la cellule

Avant de pouvoir appliquer la résine de façon automatisée, il a fallu réaliser une série d'étapes préparatoires pour rassembler les équipements et valider le fonctionnement de chaque composante. Une cellule robotique a été déménagée de chez Pratt & Whitney Canada vers un centre de recherche désigné pour la durée du projet (figure 3.1).

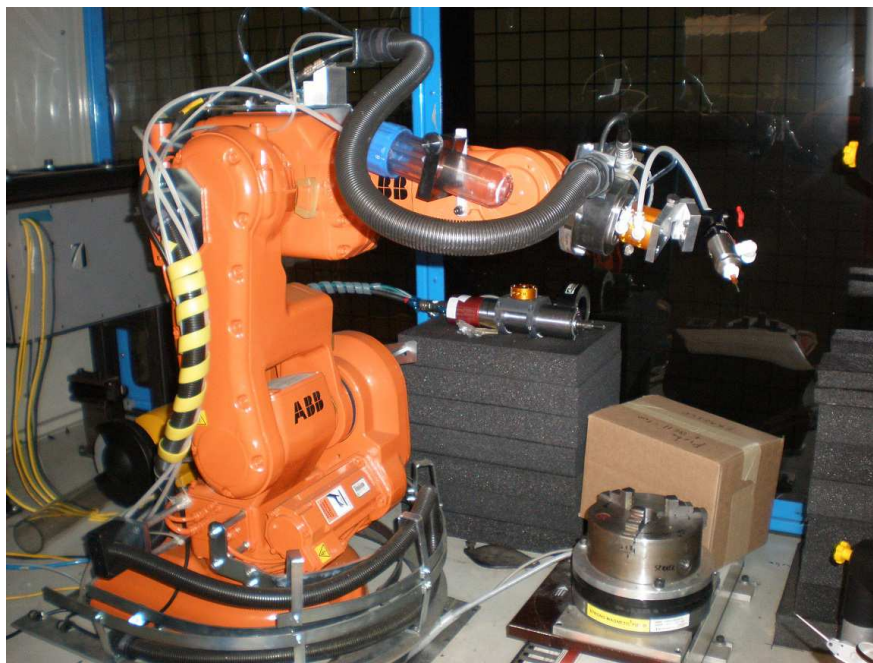


FIGURE 3.1 Cellule robotique utilisée pour la preuve de concept

La pression d'air utilisé pour propulser la résine est ajustée manuellement au moyen d'un régulateur de pression. L'air d'actionnement de la valve est quand à lui commuté par un relais connecté au contrôleur pneumatique. Ce contrôleur pneumatique est relié au module d'entrée-sortie du contrôleur robotique, ce qui permet aux programmes de gérer directement l'application de la résine. Les outils sont montés à l'extrémité du manipulateur au moyen d'un changeur d'outils (figure 3.2), ce qui permet d'alterner entre le palpeur pour la localisation de la pièce et l'applicateur de résine. Le changeur d'outil permet également de fournir l'air comprimé au travers du robot, ce qui évite de déconnecter les tubes d'air comprimé lorsqu'on effectue un changement d'outil. D'autres équipements utilisés sont présentés à la figure 3.3.

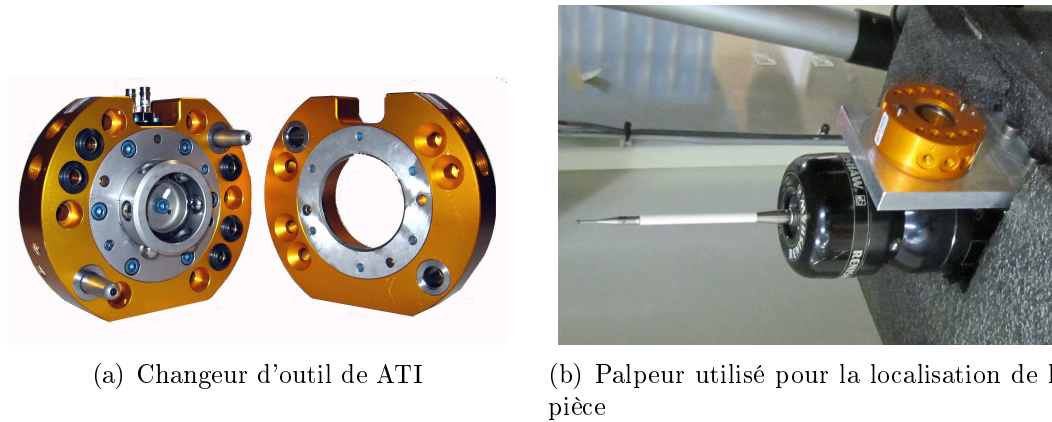


FIGURE 3.2 Connection de l'outil au robot via un changeur d'outil

Les pièces ciblées par ce projet (figure 3.4) ont une forme toroïdale (ou celle d'un “beigne”). Étant donné la taille de l'outil, il est parfois impossible de positionner son extrémité de façon parfaitement perpendiculaire aux faces intérieures. Des simulations dans CATIA ont permis de déterminer qu'un angle d'ouverture de la monture de 30° permettait d'atteindre un maximum de surfaces.

La conception initiale (figure 3.5) avait pour but de permettre l'essai de différentes configurations en permettant un angle d'ouverture ajustable au moyen d'une clé hexagonale, permettant un ajustement par incréments de 30° . La présence d'un pivot ajoute une imprécision dans la position de l'extrémité de l'outil. Dès qu'il y a collision ou simplement démontage puis réassemblage, il est impossible de garantir la position exacte du TCP. Un déplacement à l'extrémité de plus de 2 mm a été mesuré entre deux serrages. Le prochain modèle sera complètement rigide afin d'éviter tout changement du TCP suite à une opération de maintenance. Une forme plus élancée permettra d'atteindre les surfaces intérieures des pièces. Enfin, cette lance sera creuse afin de contenir les conduites de résine et d'air pour réduire au maximum l'encombrement spatial.



(a) Aspiration locale des COV



(b) Porte-cartouche



(c) Axe rotatif



(d) Lampe UV

FIGURE 3.3 Divers équipements utilisés pour la déposition automatisée

3.2 Caractérisation de l'écoulement

3.2.1 Courbes pression-débit

Dix plaquettes métalliques ont été burinées et pesées préalablement. La résine a été déversée durant 10 secondes sur chacune d'entre elles en variant la pression d'air de 0.7 à 6.2 bar (10 à 90 psi). Les plaquettes ont été pesées à nouveau une fois la résine durcie. La perte de masse observée lors du durcissement par rayonnement UV (figure 3.6) correspond au taux de COV¹ présent dans le produit. Ce taux a été mesuré par le fournisseur selon la norme ASTM 5403-93² en utilisant la méthode de mesure "A" qui détermine le pourcentage massique de composés organiques volatiles dans des adhésifs et revêtements durcis par la lumière UV. Pour la résine utilisée, le taux de COV est de 0.5938%. Pour les plus gros dépôts (pressions élevées), on observe une très forte corrélation entre la mesure et la valeur normalisée.

Le débit instantané des valves a été obtenu en divisant la masse déposée par le temps

1. Composés organiques volatiles

2. Norme décrivant une méthode standardisée de mesure du taux de composés organiques volatiles présents dans des uréthanes durcis aux rayons UV



FIGURE 3.4 Pièce typique montée sur le poteau

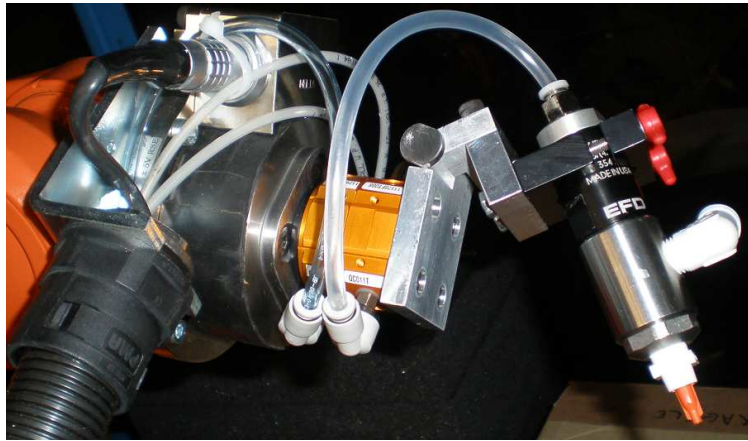


FIGURE 3.5 Conception initiale de monture ajustable pour le fusil

d'ouverture de la valve et la densité du produit, voir équation (3.1). Les débits mesurés pour diverses combinaisons d'embout/fusil sont présentés à la figure 3.7. Les embouts utilisés pour l'analyse actuelle ont été présentés à la figure 2.25.

$$Q = \frac{\Delta M}{\rho \Delta t} \quad (3.1)$$

Le nombre de reynolds pour l'écoulement de la résine dans l'aiguille peut se calculer

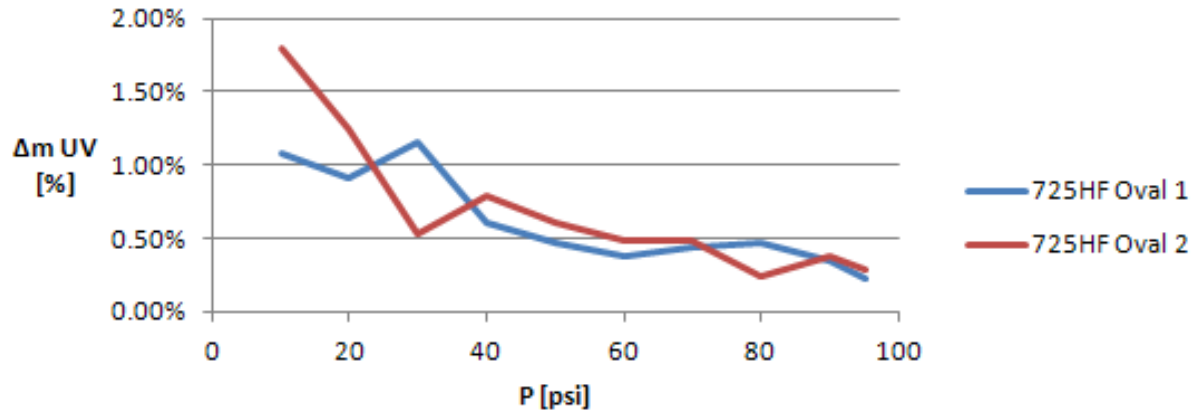


FIGURE 3.6 Perte de masse mesurée lors de la cuisson UV

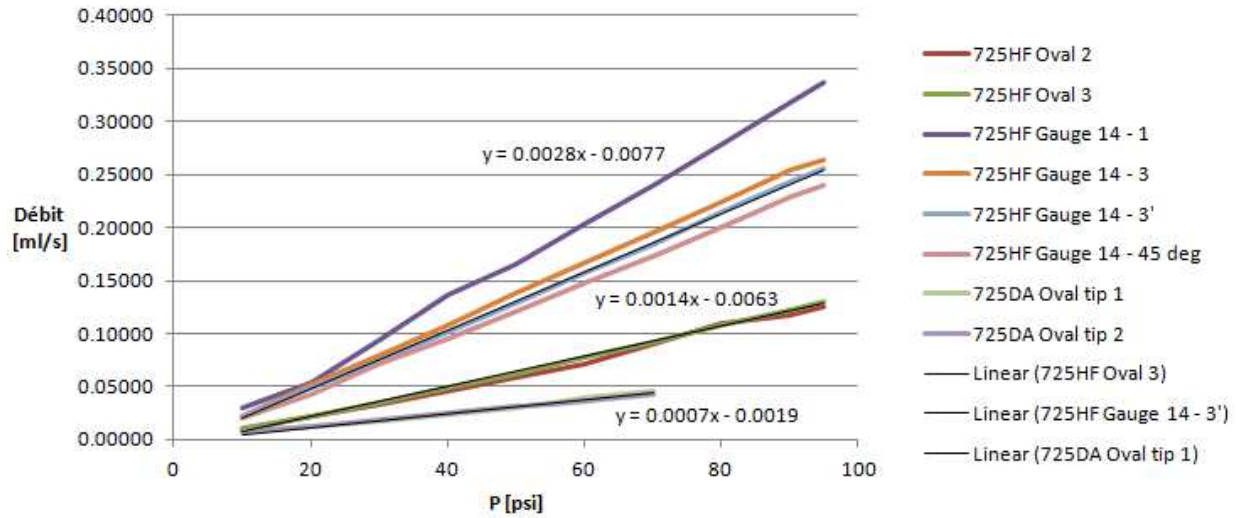


FIGURE 3.7 Débit mesuré en fonction de divers embouts et fusils

ainsi :

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (3.2)$$

Pour obtenir le diamètre spécifique D_h , l'équation suivante est utilisée :

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (3.3)$$

TABLEAU 3.1 Paramètres de l'écoulement pour la résine choisie

ρ	1130 kg/m ³
v	0.1 m/s
D_h	8.29×10^{-4} m
μ	45 Pa · s

Avec les valeurs mentionnées dans le tableau 3.1, on obtient un nombre de Reynolds de 0.002, ce qui correspond à un écoulement très laminaire. Ceci s'explique par la viscosité très élevée de la résine ainsi que la très faible vitesse d'écoulement du fluide. Il en résulte un profil de vitesse parabolique avec une vitesse nulle à la couche limite et une vitesse maximale ($V_{max} = 2V_{moy}$) au centre de l'aiguille. Ceci est vérifié expérimentalement (figure 3.8) par le profil semi-elliptique du dépôt. La vitesse moyenne, ou vitesse unitaire V_u est le sujet de la section suivante.

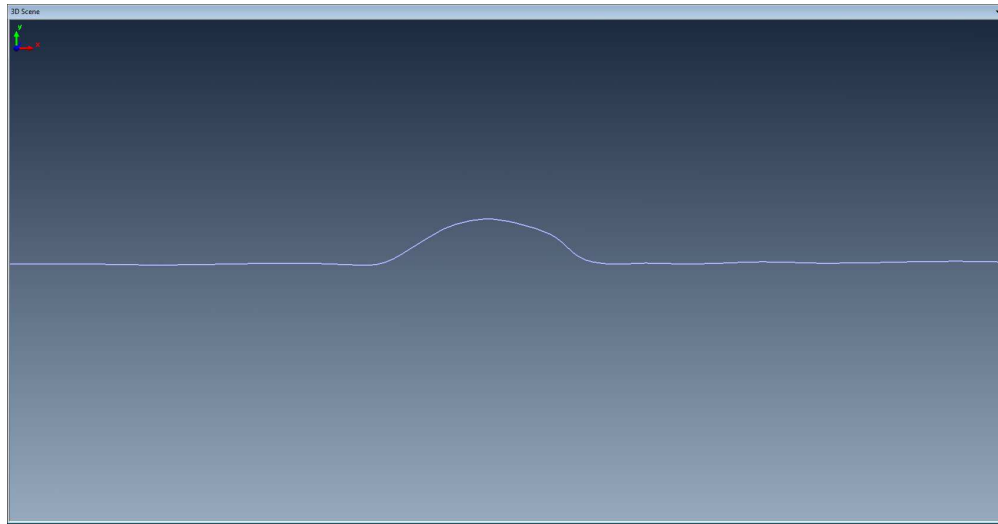


FIGURE 3.8 Section d'un cordon type déposé par le robot et visualisée dans un logiciel de traitement de nuages de points

3.2.2 Vitesse d'avance relative à V_u

Calcul de l'aire de section

L'aire de section d'écoulement a été mesurée au microscope (figure 3.9). Pour les embouts ronds, l'aire est celle du cercle inscrit à l'intérieur de l'aiguille. L'aire intérieure de l'embout

ovale a été calculée en soustrayant les 4 coins quasi-elliptiques du rectangle dans lequel est inscrit le profil de section.

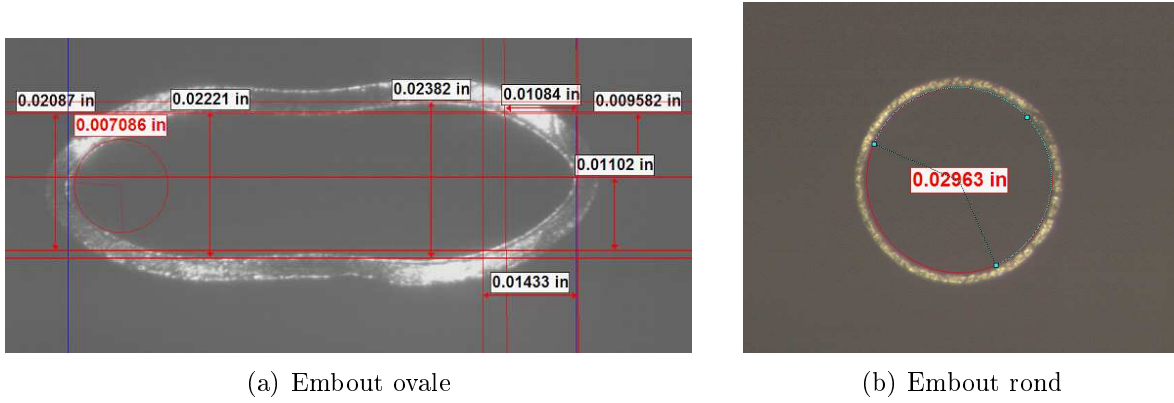


FIGURE 3.9 Mesure au microscope des dimensions importantes des embouts

Calcul de la vitesse unitaire V_u

Une fois le débit et l'aire de section connue, il est possible de calculer une vitesse de sortie unitaire au niveau de l'embout :

$$V_u = \frac{Q}{A} \quad (3.4)$$

En faisant comme hypothèse que l'écoulement est uniforme à travers l'aire de section mesurée, V_u correspond donc à une vitesse d'écoulement moyenne du fluide. Puisqu'il a été démontré que Q est essentiellement une fonction de la pression P_{alim} , on peut obtenir une prédiction de la vitesse d'avance de l'outil en fonction des paramètres du procédé.

Dans une situation où la vitesse d'avance n'est pas un élément contrôlable du procédé, il est possible de faire varier la pression d'alimentation afin de préserver un taux de déposition constant. Il suffit d'inverser la relation précédente pour obtenir $P = f(V_u)$.

3.2.3 Effet de la vitesse sur le profil obtenu

Pour mesurer la qualité de la relation entre V_u et donc la vitesse d'avance, dix cordons ont été effectués avec une vitesse V_n variant de 0.5 à 1.4 fois V_u par incrément de $0.1V_u$. Pour cette analyse, les paramètres d'écoulement ont été fixés (tableau 3.2).

Le profil a été mesuré au moyen d'une caméra laser de la compagnie FARO montée au bout d'un bras à encodeurs de la même compagnie. La résine étant un matériau transparent

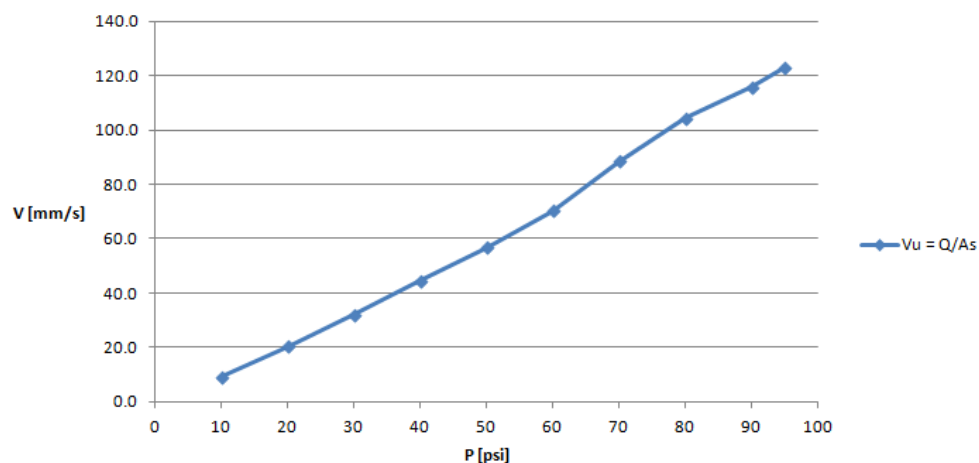


FIGURE 3.10 Vitesse d'avance V_u en fonction de P pour un embout oval

TABLEAU 3.2 Paramètres décrivant la déposition pour la caractérisation du cordon en fonction de la vitesse

Symbole	Variable
P_{atim}	2.75 bar (40 psi)
V_u	44.4 mm/s
Embout	Ovale

et le substrat étant très réfléchissant, il a fallu recouvrir les échantillons d'une mince couche ($25\ \mu\text{m}$) de nitrate de bore pour uniformiser la réflexion du laser (figure 3.11). Un logiciel d'inspection de nuage de points a permis de mesurer (figure 3.12) l'épaisseur et la largeur du cordon à l'interface masque-pièce (figures 3.13 et 3.14). Ces données ont permis également de calculer l'aire de section.



FIGURE 3.11 Échantillon couvert de nitrate de bore pour faciliter la numérisation

L'analyse des résultats a permis de tracer la relation entre le taux de déposition surfacique

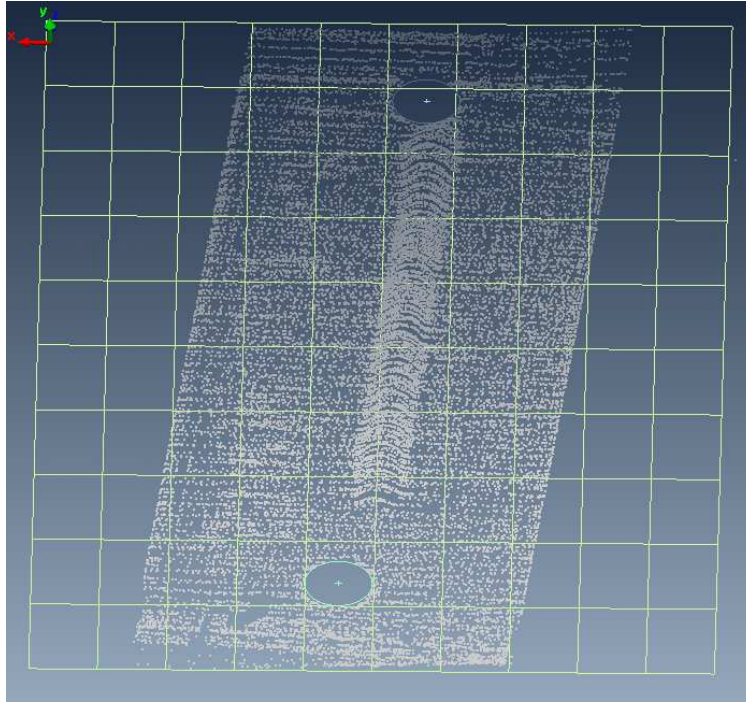


FIGURE 3.12 Numérisation 3D d'un cordon au moyen d'un bras FARO muni d'une caméra laser

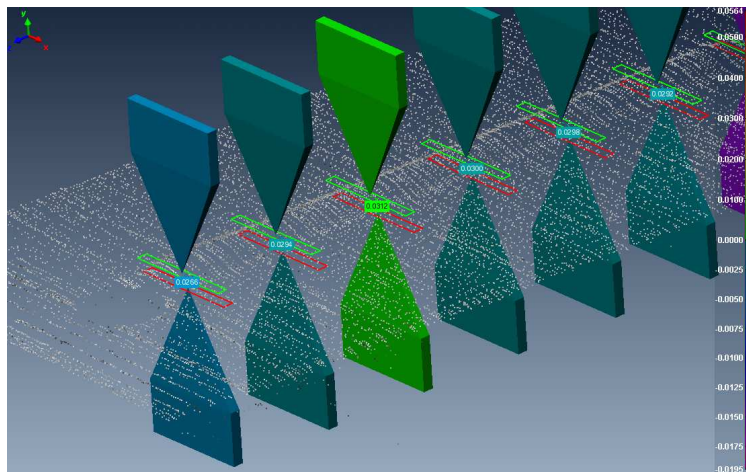


FIGURE 3.13 Mesure de l'épaisseur des cordons

(mm^3/mm^2) et les dimensions du cordon obtenu (largeur, épaisseur, aire). Ces données seront utiles pour développer un modèle de déposition, basé sur des équations de continuité (voir section 3.3.3).

On peut ainsi obtenir une corrélation entre l'aire mesurée et l'aire de section $A_p = Q/V$. Cette aire et conséquemment la taille du dépôt peut être prédite en utilisant la conservation

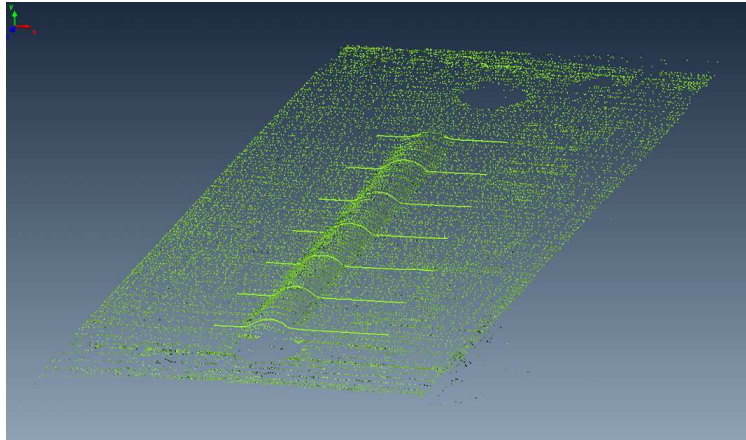


FIGURE 3.14 Extraction des profils de section des cordons

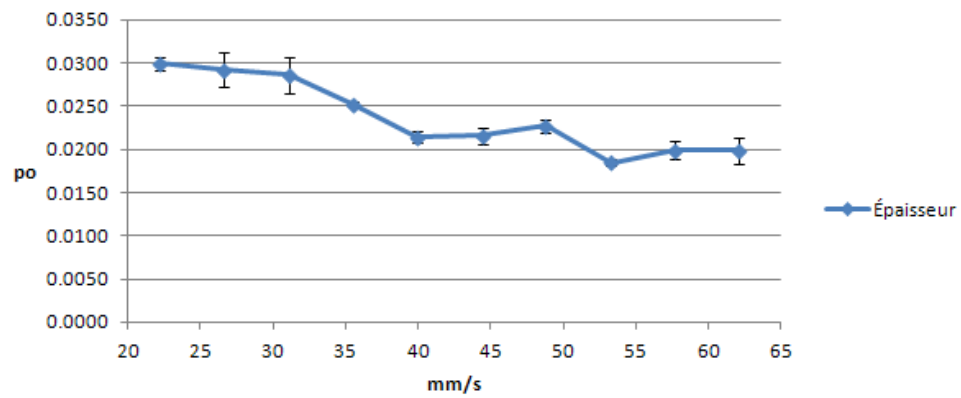


FIGURE 3.15 Épaisseur des cordons en fonction de la vitesse d'avance

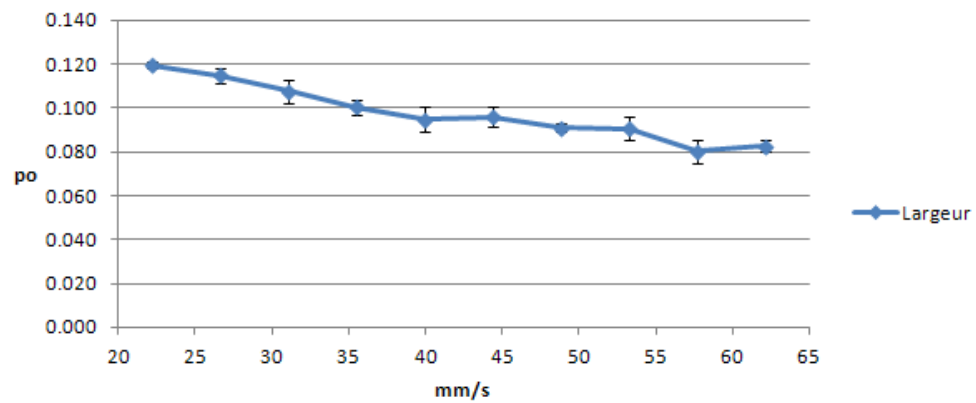


FIGURE 3.16 Largeur des cordons en fonction de la vitesse d'avance

du volume (voir équation 3.5). Les mesures expérimentales (figure 3.17) démontrent l'exactitude de cette relation, qui peut être utilisée pour modéliser et prédire la déposition. Un profil de section semi-elliptique (voir équation 3.6) a été utilisé pour calculer l'aire de section mesurée A_m en fonction de l'épaisseur et la largeur :

$$A_p = \frac{Q}{V} = \frac{f(P)}{V}, \quad (3.5)$$

$$A_m = \frac{\pi ab}{2}. \quad (3.6)$$

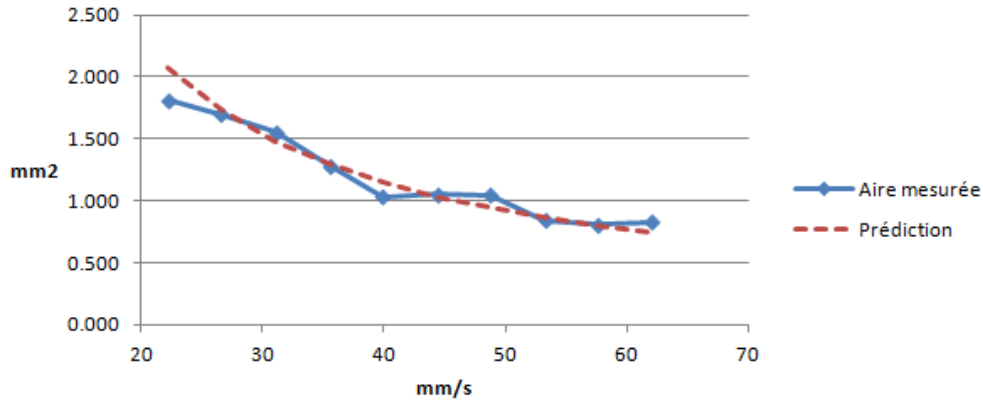


FIGURE 3.17 Corrélation entre l'aire mesurée et l'aire prédite

La corrélation ainsi que la dépendance linéaire entre la pression, la vitesse d'avance et les dimensions du cordon déposé indiquent que le taux de transfert de résine sur le substrat (mm^3/mm^2) est le principal critère de performance pour une recette particulière de masquage. Tant que les pressions et les vitesses respectent les limites pratiques et sécuritaires des équipements, optimiser le procédé se réduit à choisir la combinaison embout/pression offrant le plus grand débit absolu. Lorsque la résine est déposée sur une surface horizontale, le profil obtenu est parfaitement symétrique et quasi semi-elliptique. Lorsque le produit est déposé sur une surface verticale, il s'écoule très lentement vers le bas. Cependant, étant donné la haute viscosité du produit, il est possible de durcir le produit sans que le positionnement de la bande n'ait beaucoup changé.

3.3 Stratégies d'approche et de remplissage

Une fois le modèle de formation d'une ligne continue bien établi, l'étape logique subséquente est d'étudier l'impact des phases d'approche et de retrait de l'outil. Ensuite, trois

principales stratégies de remplissage ont été modélisées, programmées puis exécutées par le robot afin de comparer leur performances relatives. Les méthodes présentées dans cette section ont été implémentées sur des surfaces planes, mais les principes sous-jacents peuvent quant à eux être étendus à des géométries plus complexes.

3.3.1 Approche et retrait de la pièce

Pour une projection sur une surface à plat, l'expérience démontre qu'il faut démarrer le fusil avant de débiter le mouvement pour laisser le temps au fluide d'atteindre la surface (figure 3.18). Ce délai ($d_{t,0}$) varie selon les configurations et peut être déterminé de façon empirique une fois la recette établie (résine, outil, embout, pression, vitesse d'avance). Par ailleurs, il faut attendre un certain moment ($d_{t,1}$), une fois le fusil éteint pour que le fluide puisse se détacher complètement de l'embout. Un délai constant de 2 s est suffisant dans ce cas.

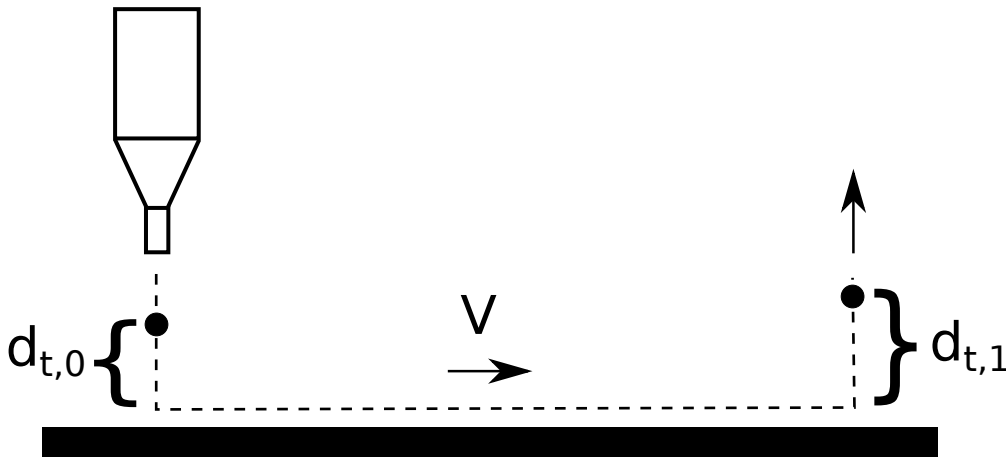


FIGURE 3.18 Délai d'approche $d_{t,0}$ et de retrait $d_{t,1}$ de l'outil

3.3.2 Stratégies de remplissage

Le chevauchement peut être défini comme le taux de recouvrement de la surface en fonction des dimensions de l'outil et des distances interpasses de la trajectoire. La figure 3.19 illustre les paramètres l_n et l_i , qui correspondent respectivement à la longueur normale (ou de "front") et à la longueur interpasse, soit celle entre chacune des rangées :

$$c = \frac{l_n}{l_i}. \quad (3.7)$$

L'approche la plus simple pour couvrir une surface plane est la juxtaposition de lignes droites indépendantes, avec ouverture et fermeture du fusil pour chacune d'elles (figure 3.19). Cette méthode donne des résultats quasi uniformes, mais au coût d'un temps de procédé élevé. De plus, l'ouverture et la fermeture fréquente du fusil rend le mouvement du robot moins fluide et multiplie le nombre de régions de transition.

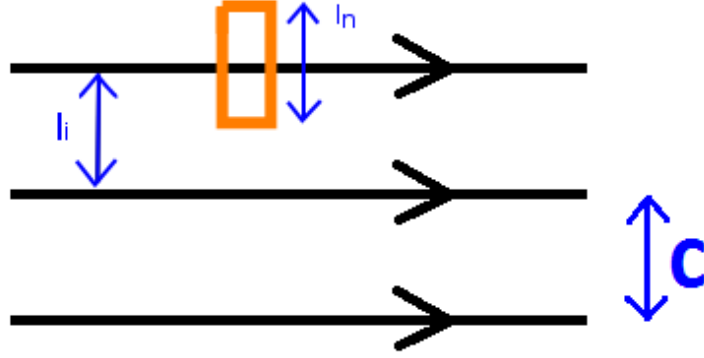


FIGURE 3.19 Trajectoire générée par une stratégie de type "discontinu" et illustration des paramètres l_n et l_i utilisés dans les calculs

La seconde méthode essayée est celle des méandres ou "zig-zag" (figure 3.20). Cette approche est à la base de nombreux procédés de couverture surfacique (ANTONIO, RAMABHADRAN et LING, 1997 et HERTLING et al., 1996), puisqu'elle permet de couvrir facilement une surface quelconque sans avoir à ouvrir ou fermer l'outil applicateur, ce qui économise du temps et évite les problèmes de qualité au niveau des zones transitoires.

Il est aussi possible de remplir une surface en décrivant une spirale, en traçant d'abord le contour de cette surface, puis en convergeant vers le centre (figure 3.21) ou inversement.

Pour générer une trajectoire de ce type, les points 1 à 3 doivent au minimum être définis. Les points subséquents sont calculés à partir des relations suivantes :

$$\mathbf{P}_4 = \mathbf{P}_3 + (\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2), \quad (3.8)$$

$$\mathbf{P}_5 = (\|\mathbf{P}_4 - \mathbf{P}_1\| - l_i) \frac{\mathbf{P}_4 - \mathbf{P}_1}{\|\mathbf{P}_4 - \mathbf{P}_1\|} + \mathbf{P}_4, \quad (3.9)$$

$$\mathbf{P}_n = f(\mathbf{P}_{n-5}, \mathbf{P}_{n-4}, \mathbf{P}_{n-1}, l_i) \quad \forall n \geq 6. \quad (3.10)$$

avec \mathbf{P}_n correspondant à la position du point n de la séquence et l_i à la distance interpasse :

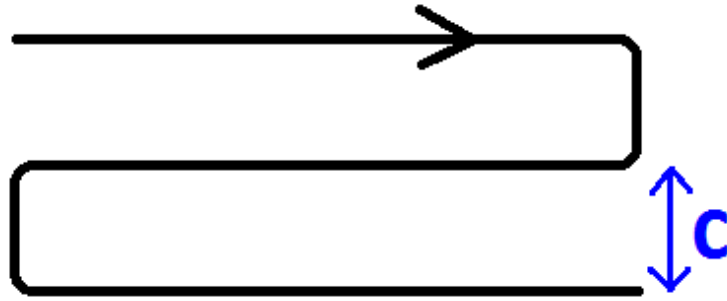


FIGURE 3.20 Trajectoire générée par une stratégie de type "méandre"

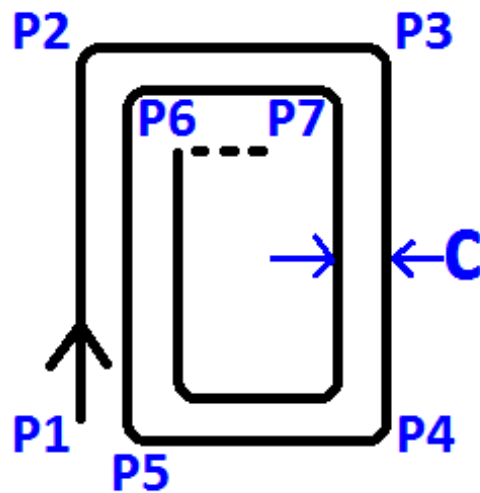


FIGURE 3.21 Trajectoire générée par une stratégie de type "contour"

$$\mathbf{P}_n = (\|\mathbf{P}_{n-5} - \mathbf{P}_{n-4}\| - l_i) \cdot \frac{\mathbf{P}_{n-5} - \mathbf{P}_{n-4}}{\|\mathbf{P}_{n-5} - \mathbf{P}_{n-4}\|} + \mathbf{P}_{n-1}, \quad \forall n \geq 6. \quad (3.11)$$

Entre chaque point, l'orientation outil serait corrigée afin que la direction principale, ou front de l'outil, suive le vecteur $\mathbf{O}_n = \mathbf{P}_n - \mathbf{P}_{n-1}$. Mathématiquement, cette approche est plus simple, car l'outil n'a qu'une seule direction principale. En pratique par contre, effectuer une rotation de 90 degrés dans le repère outil requiert de grands déplacements articulaires du robot, et il est presque impossible de garantir soit une vitesse d'exécution

suffisante, soit l'évitement de singularités ou de collisions avec la pièce ou l'environnement. Si l'outil est axisymétrique, comme dans le cas d'une aiguille cylindrique (figure 3.9(b)), il est possible d'utiliser l'équation (3.11) sans effectuer de rotation outil. Cependant, pour un embout rectangulaire, il faut tenir compte des directions principales.

Utiliser les directions principales de l'outil complexifie sa modélisation, mais évite une rotation physique du poignet aux points d'inflexion. Pour ce faire, il importe de modéliser l'outil avec deux directions principales, comme dans le cas de l'embout ovale. La vitesse d'avance est ajustée afin de maintenir un taux de transfert constant en ajoutant un facteur de front :

$$V'_u = \frac{Q}{A} \frac{l_p}{l_f}. \quad (3.12)$$

Où l_f fait référence à la distance frontale de l'outil, et l_p à la profondeur de l'outil (figure 3.22). Pour un embout rond, $\frac{l_p}{l_f} = 1$ pour toute direction d'avance.

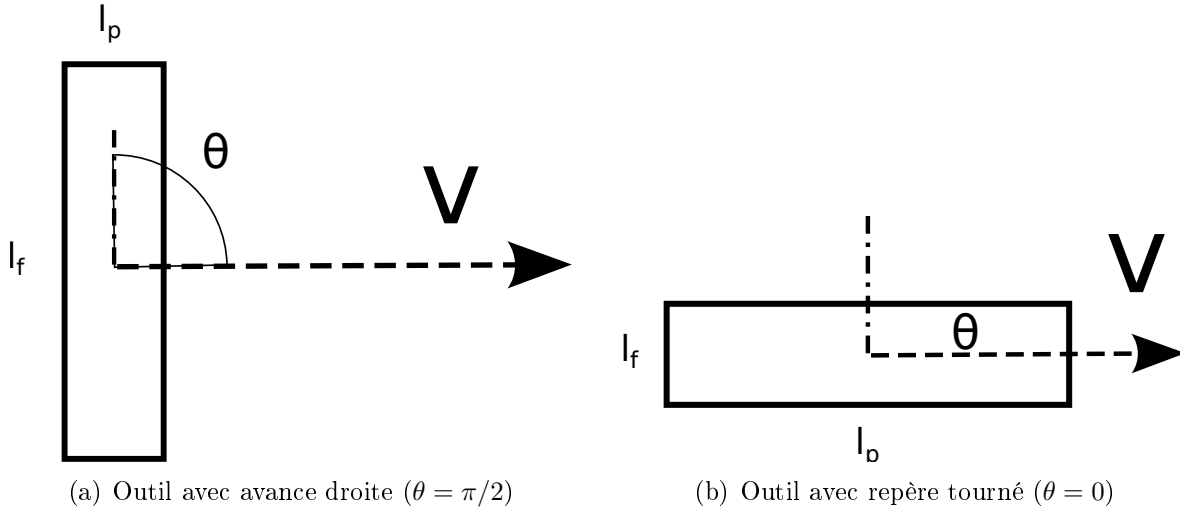


FIGURE 3.22 Illustration des dimensions principales et secondaires de l'outil

3.3.3 Optimisations

Les trois méthodes de couverture planaires présentées peuvent être analysées au moyen d'équations de continuité sur le volume déposé dans le but d'uniformiser le dépôt sur toute la course de l'outil. En effet, les stratégies "méandre" et "spirale" réalisées à vitesse constante engendrent toutes deux une surépaisseur accompagnée d'un évasement proportionnel dans les zones de transition. Pour contrer ces effets indésirables, il faut bâtir un modèle permettant de calculer dans un premier temps le volume excédentaire. Les hypothèses suivantes sont prises en compte par ce modèle :

1. Le débit est constant dans le temps ($\dot{Q} = 0$) ;
2. Le profil de déposition est connu et constant dans le temps.

Une fois ces hypothèses posées, il serait possible de construire un modèle prédisant la déposition de la résine, en intégrant l'épaisseur accumulée sur des éléments surfaciques. Il faudrait cependant y inclure l'écoulement du fluide par gravité et par capillarité. Cette tâche dépasse l'objectif du présent projet. Cependant, les hypothèses mentionnées ci-haut suffisent à élaborer des stratégies d'optimisation de la trajectoire afin d'obtenir une couverture plus uniforme en épaisseur.

En exécutant des trajectoires de type méandre ou contour, on remarque que le robot ne peut pas effectuer une trajectoire non-dérivable. Le contrôleur du robot limite les accélérations à une certaine valeur, pour éviter la saturation des actionneurs et empêcher tout dépassement. Il en résulte que le robot passe plus de temps que prévu à certaines positions, ce qui engendre une déposition excessive à ces endroits. En analysant la lecture des encodeurs du robot durant l'exécution de la trajectoire, on peut déceler des endroits où le contrôleur est incapable de suivre le profil demandé (figure 3.23). Ce n'est pas le cas pour la stratégie discontinue (figure 3.24) puisqu'elle ne comporte pas de point d'inflexion. Afin de préserver une épaisseur constante, il faut donc introduire des stratégies de compensation soit sur le débit, soit sur la trajectoire outil.

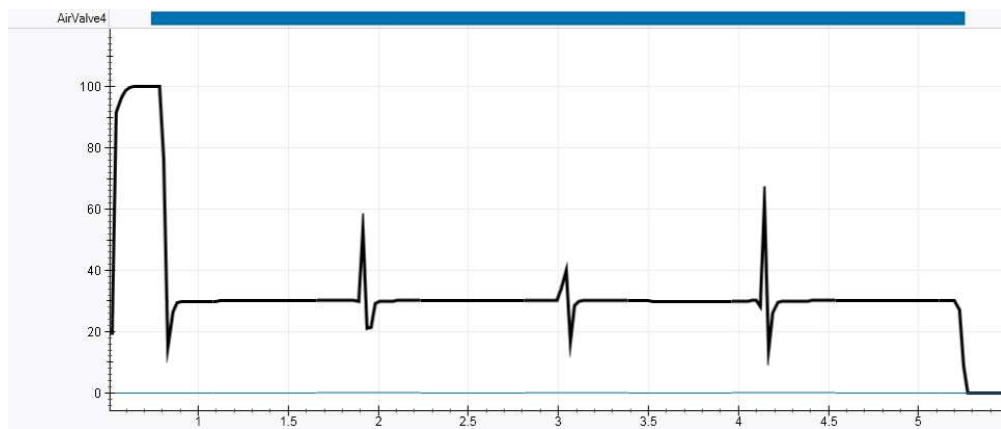


FIGURE 3.23 Discontinuité dans les vitesses du TCP suite à une commande échelon en vitesse pour la stratégie méandre

Il a été démontré que le débit volumétrique de la résine est proportionnel à la pression d'alimentation (section 3.2.1). Une première façon d'uniformiser la déposition sans créer de changements de vitesse brusques est de moduler la pression à l'approche des points d'inflexion de la trajectoire et de la rétablir à la sortie de cette zone. L'utilisation de régulateurs de

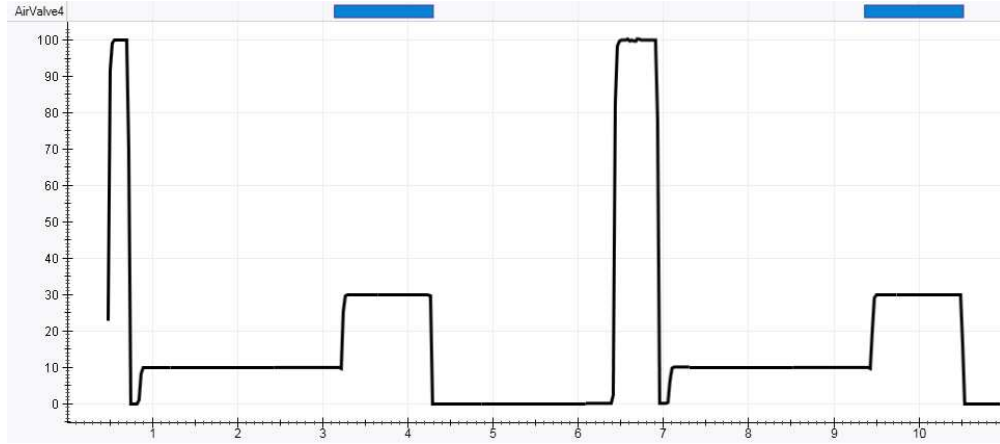


FIGURE 3.24 Profil de vitesse pour une trajectoire de type “discontinu” ne présentant pas de discontinuités

pression tels ceux de SMC (figure 3.25) permettent ceci. La boucle de contrôle d’un tel système est présentée à la figure 3.26.



FIGURE 3.25 Régulateur de pression ITV1000 de la compagnie SMC

La zone de chevauchement peut être définie par la portion du substrat sur lequel la projection de l’embout passe plus de temps que normalement (figure 3.27). La longueur de cette zone est donnée par la distance d_i et sa largeur par le chevauchement c . Normalement, cette zone a la taille de l’outil dans sa direction maximale. Lorsque l’outil entre dans cette zone, la pression est ajustée en fonction du taux de recouvrement excédentaire R :

$$Q_R = Q_{nom} \frac{1}{R}. \quad (3.13)$$

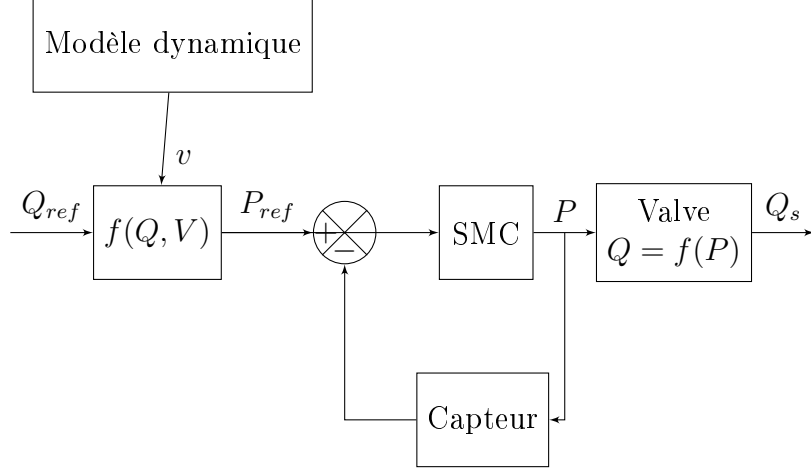


FIGURE 3.26 Boucle de compensation dynamique de la pression en fonction du taux de recouvrement et de la vitesse instantanée

Ce taux de recouvrement est déterminé au moyen du modèle de déposition ou déterminé de façon empirique, une valeur de 1.5 à 2 étant une valeur de départ ayant donné de bons résultats. Une autre possibilité est l'introduction de points intermédiaires. Cette approche vise à exprimer l'épaisseur déposée au moyen d'une équation de continuité, en vue d'introduire des points intermédiaires avec accélérations locales. De façon générale, l'épaisseur spécifique e_s est un bon indicateur de l'uniformité du revêtement :

$$e_s = \frac{Q}{Vl_n}, \quad (3.14)$$

où Q est le débit, V la vitesse tangentielle et l_n la largeur normale à la direction d'avance. Pour des bandes disposées parallèlement l'une à l'autre, on introduit le taux de chevauchement :

$$e_s = \frac{Qc}{Vl_n}. \quad (3.15)$$

Dans les intervalles $\mathbf{P_1P_2}$ et $\mathbf{P_2P_3}$ (figure 3.27), les épaisseurs déposées correspondent à :

$$e_{s,12} = \frac{Qc}{V_{(P_1P_2)}l_n}, \quad (3.16)$$

$$e_{s,23} = \frac{Q}{V_{(P_2P_3)}l_t}. \quad (3.17)$$

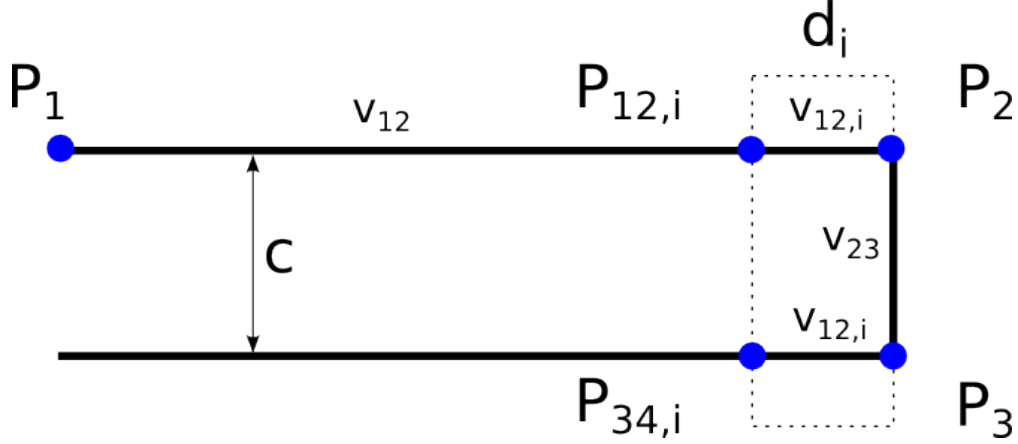


FIGURE 3.27 Illustration des variables utilisées dans le calcul pour l'optimisation de la trajectoire "méandre"

Où c est le taux de chevauchement adimensionnel, l_n la largeur normale de l'outil en mm, l_t la largeur perpendiculaire de l'outil en mm, V la vitesse d'avance en mm/s et Q le débit en mm^3/s . L'épaisseur effective déposée dans la zone de transition s'exprime par la superposition des deux contributions :

$$e_{s,eff} = e_{s,12} + e_{s,23}. \quad (3.18)$$

Où $e_{s,12}$ correspond à l'épaisseur moyenne déposée lors du parcours entre les points \mathbf{P}_1 et \mathbf{P}_2 . $e_{s,23}$ correspond à la surdéposition effectuée lorsque l'outil se déplace entre les deux lignes. Puisque v_{23} a une valeur finie (le robot ne pouvant pas sauter instantanément des points \mathbf{P}_2 à \mathbf{P}_3), elle doit être compensée par une augmentation de la vitesse d'avance en approche de la zone de transition. En considérant la superposition des trajectoires $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$ et $\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3$, nous obtenons une déposition combinée :

$$e_{s,eff} = \frac{qc}{v_{12,i}l_n} + \frac{l_t}{d_i} \frac{q}{v_{23}l_t}, \quad (3.19)$$

si $d_i = l_t$:

$$e_{s,eff} = \frac{qc}{v_{12,i}l_n} + \frac{q}{v_{23}l_t}. \quad (3.20)$$

Où $v_{12,i}$ correspond à la vitesse modifiée. Le problème d'optimisation se formule comme suit. Pour calculer la vitesse d'avance $v_{12,i}$ dans la zone de transition, il faut poser l'égalité

suivante :

$$e_{s,12} = e_{eff}, \quad (3.21)$$

$$\frac{qc}{v_{12}l_n} = \frac{qc}{v_{12,i}l_n} + \frac{l_t}{d_i} \frac{q}{v_{23}l_t}. \quad (3.22)$$

L'équation se simplifie ensuite :

$$\frac{c}{v_{12}l_n} = \frac{c}{v_{12,i}l_n} + \frac{l_t}{d_i} \frac{1}{v_{23}l_t}, \quad (3.23)$$

$$c = c \frac{v_{12}}{v_{12,i}} + \frac{v_{12} l_n}{v_{23} d_i}. \quad (3.24)$$

En fixant d_i , v_{12} et v_{23} dans l'équation, on obtient une formulation pour $v_{12,i}$:

$$\alpha_{12} = \frac{c - \frac{v_{12} l_n}{v_{23} d_i}}{c}, \quad (3.25)$$

$$v_{12,i} = \frac{v_{12}}{\alpha_{12}}. \quad (3.26)$$

Les valeurs suivantes ont été fixées pour fin de comparaison : $c = 1$, $v_{12} = 30$, $v_{23} = 100$ et $l_n = 2$. Le tableau 3.3 illustre différentes valeurs de $v_{12,i}$ en fonction de la zone d_i .

TABLEAU 3.3 Valeurs de $v_{12,i}$ en fonction de la dimension de la zone d_i

d_i (mm)	$v_{12,i}$ (mm/s)
0.75	150
1	75
1.25	57.7
1.5	50

Le choix de d_i est très important. Une première approximation est celle de mesurer la zone de surdéposition sur les échantillons. Avec une valeur de 1 mm, on obtient déjà de bons résultats. On remarque que $v_{12,i}$ ne dépend pas du débit q , et donc est indépendant de la pression d'alimentation, de la viscosité ou tout autre paramètre propre au procédé. Seuls des paramètres géométriques déterminent la vitesse d'avance optimisée. Toutefois, la méthode de méandre modifiée n'élimine pas les discontinuités dans la trajectoire (figure 3.28).

Les changements de directions brusques peuvent être évités en décrivant des arcs de cercles pour joindre deux lignes. Dans un contrôleur ABB, ceci se fait au moyen du vecteur **ZONEDATA**, qui spécifie de combien le robot peut dévier de la trajectoire lorsqu'il change de direction (figure 3.29).

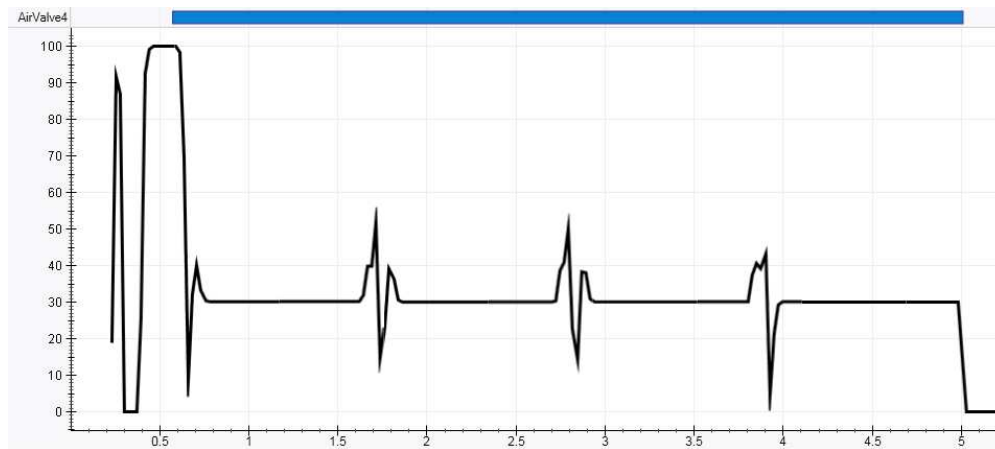


FIGURE 3.28 Discontinuité dans les vitesses suite à une commande échelon en vitesse (stratégie méandre avec des points intermédiaires)

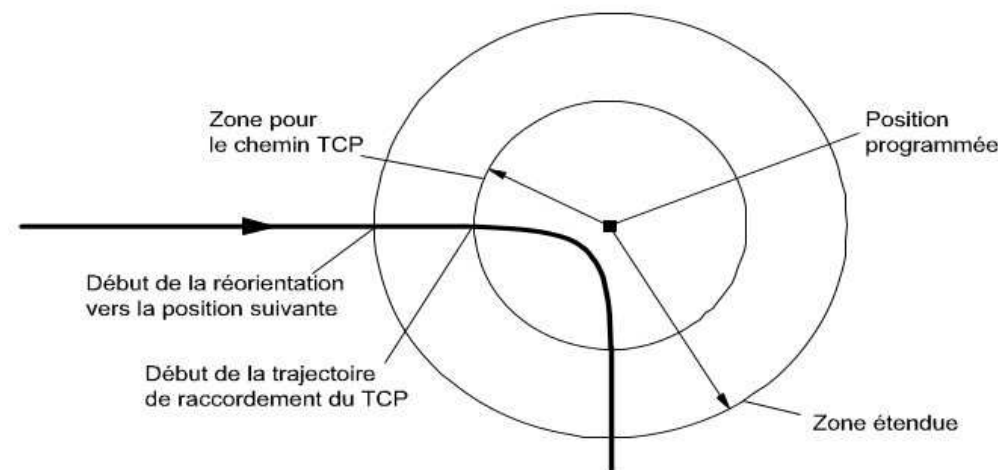


FIGURE 3.29 Illustration du “zonedata” dans un contrôleur ABB tirée du manuel de référence technique pour les instructions du langage RAPID

3.3.4 Choix des stratégies ou optimalité selon le contexte

L'ajout de points intermédiaire est une solution lourde mathématiquement qui impose des changements de vitesse fréquents au robot. L'ajustement de la pression d'alimentation permet de compenser les discontinuités dans la vitesse outil de façon plus élégante en ajustant le débit lorsque nécessaire. Il faut cependant compter sur une autre boucle de contrôle ajoutant à son tour de la complexité au modèle et au générateur de trajectoire. On peut alors considérer la pression comme une variable de plus de la trajectoire, à l'instar des axes robots et des axes auxiliaires.

Cependant, ces deux méthodes assurent un suivi précis de la trajectoire nominale et réduisent au minimum les rayons aux coins des zones masquées. Dans un contexte où la définition des coins est critique, il faut alors compter sur l'une de ces méthodes ou sur une combinaison des deux.

Dans une situation où le rayon de virage peut être agrandi, il est plus approprié d'agrandir le rayon permis au contrôleur robot afin d'adoucir les courbes de vitesse du robot.

3.4 Calibration et systèmes de coordonnées

Un palpeur est utilisé pour localiser précisément les différents repères de la cellule puisque les axes auxiliaires (linéaires et rotatifs) utilisent des encodeurs relatifs. À chaque mise hors-tension de la cellule, le contrôleur perd la position de ceux-ci et il faut procéder à une nouvelle mise à zéro. Le contrôleur du robot communique avec ce palpeur au moyen d'un protocole série et peut l'activer lorsqu'il le saisi avec le changeur d'outils. Pour que le robot suive le plus fidèlement possible la simulation hors-ligne, il faut faire coïncider les deux extrémités de la chaîne cinématique (figure 3.30), soit le TCP et la position programmée dans le référentiel de la pièce, avec leur valeurs réelles.

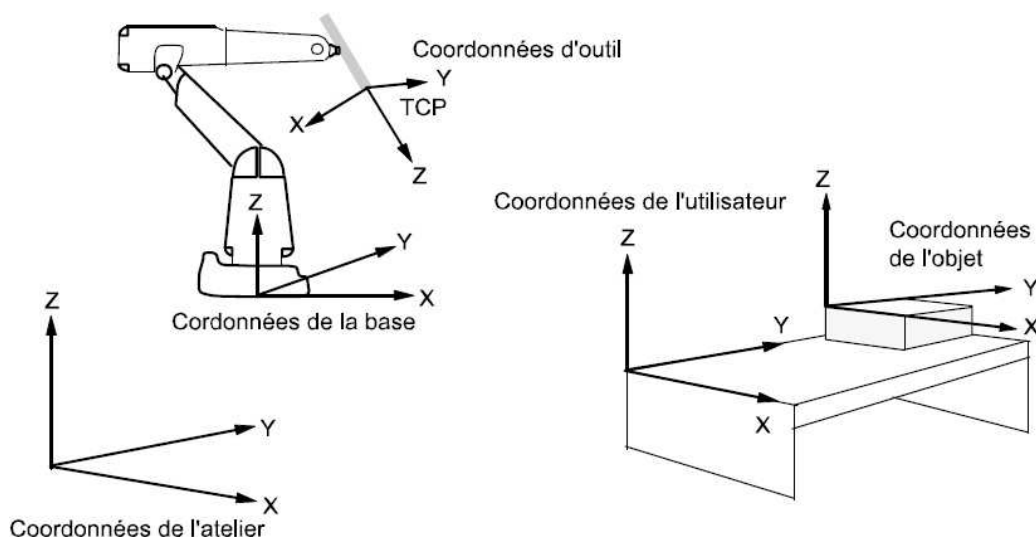


FIGURE 3.30 Repères utilisés par le programme (tiré de la documentation de référence de ABB)

Le TCP (figure 3.31) est identifié précisément en déplaçant manuellement l'outil autour d'une petite sphère en prenant soin de bouger tous les joints du robot. Cinq positions sont

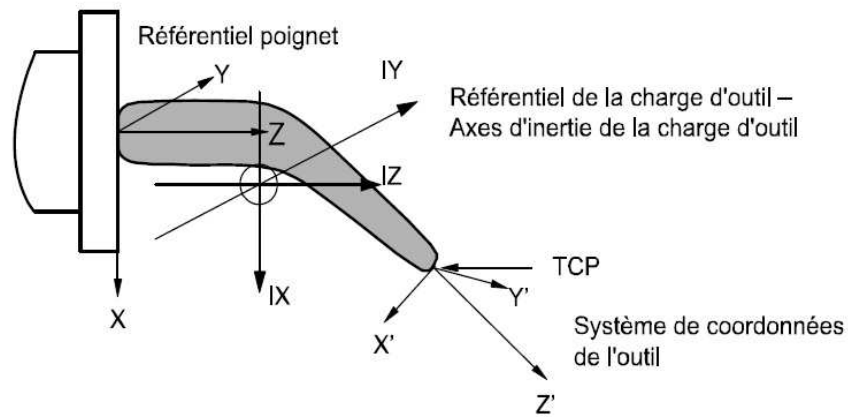


FIGURE 3.31 Illustration du référentiel outil (tiré de la documentation de référence de ABB)

enregistrées et un algorithme de moindres carrés calcule la position de l'outil, à laquelle il faut retrancher le rayon de la sphère utilisée. Le repère pièce est placé par convention au centre et à la hauteur du plan de référence du dessin. Une fois le TCP et l'objet de travail correctement définis, le programme peut être exécuté. Le recalage entre les positions nominales et réelles est effectué en temps réel par le contrôleur du robot.

3.5 Programmation du robot

Pour une application sur une surface de révolution à l'aide d'un axe rotatif, on peut transposer directement les stratégies élaborées pour la couverture planaire, à l'exception qu'une partie ou la totalité des mouvements (vitesse d'avance V_u) sont effectués par cet axe auxiliaire (figure 3.32). V_i correspond à la vitesse de saut interpasse et le chevauchement utilisé est le même que pour le cas bidimensionnel.

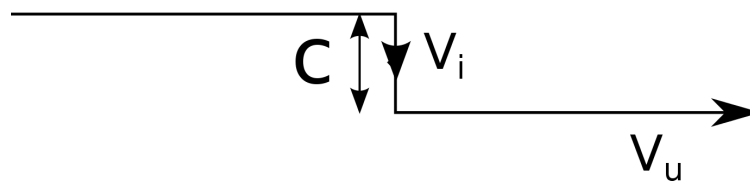


FIGURE 3.32 Transposition de la stratégie méandre sur une surface de révolution

3.5.1 Approche par interruption

La gestion des temps d'ouverture et de fermeture du fusil pour assurer un synchronisme entre la trajectoire et l'écoulement de la résine est prise en charge par les mécanismes d'interruption existant dans le contrôleur IRC5 de ABB. L'exemple 3.1 présente la commutation au moyen des commandes *TriggL* et *TriggIO*. La commande *TriggIO* définit les conditions tandis que *TriggL* effectue les mouvements. L'outil est activé un certain nombre de secondes (*dtStart*) avant d'atteindre le point de départ P_1 puis éteint au moment où il atteint le point P_2 .

```
VAR triggdata gunon;
VAR triggdata gunoff;

! Alias pour l'ouverture et fermeture de la valve
! Alias de gun a AirValve4
var signaldo CommandeValve;
AliasIO AirValve4, CommandeValve;

! Evenements de commutation de la valve pour P1 et P2
TriggIO gunon, dtStart\Time\DOP:=CommandeValve, 1;
TriggIO gunoff, dtStop\DOP:=CommandeValve, 0;

! Approche du point 1 et ouverture
TriggL Offs(P1, 0, 0, Offset), v10, gunon, z00, tmskActuel;
! Déplacement au point 2 et fermeture
TriggL Offs(P2,0,0,Offset), VRob, gunoff, fine, tmskActuel;
```

Programme 3.1 Interruptions pour actionner l'outil à des moments précis de la trajectoire

3.5.2 Structures de données

Le langage RAPID permet la création de structures personnalisées, à l'instar des types **pos** ou **orient**³ prédéfinis dans ce langage. Ainsi, il est possible de créer une structure de coordonnées polaires (Programme 3.2). Une structure **dispdata** a été créée afin de contenir l'ensemble des paramètres définissant une recette pour le masquage robotisé (Programme 3.3).

3.5.3 Génération de trajectoire

Les logiciels existants ne permettaient pas de paramétrer toutes les variables définies pour la déposition et son optimisation (section 3.3.3). Les logiciels *RobotStudio* et *Robot-*

3. **pos** contient une position cartésienne (x,y,z) et **orient** contient un quaternion (q_1, q_2, q_3, q_4)

```

RECORD polaire
    num r;
    num theta;
ENDRECORD

var polaire A := [1,pi/2];
var num y := A.r*sin(A.theta);

```

Programme 3.2 Création de structures avec le langage RAPID

```

RECORD dispdata
    num p;           # Pression d'alimentation
    num vt;          # Vitesse tangentielle
    num off;         # Offset d'application
    num retrait;     # Distance de retrait
    num dti;         # temps d'amorce pour la valve
    num dtf;         # temps de fermeture pour la valve
    num npasses;     # Nombre de passes
    num c;           # Chevauchement
    num ln;          # Dimension outil primaire
    num lt;          # Dimension outil secondaire
    num ff;          # Facteur de forme (ln/lt)
    num la;          # Largeur bande
    string embout;   # Type d'embout utilise
    bool sec;        # Sec ou mouille
ENDRECORD

! Nouvelle resine , on ne change que la pression et la vitesse
PERS dispdata D731;
D731 = D726;
D731.p = 30;
D731.vt = 62;

```

Programme 3.3 Exemple d'utilisation des structures pour une recette de masquage robotisé

Master ont été évalués, mais une méthode personnalisée a été retenue pour la génération de trajectoires (figure 3.33).

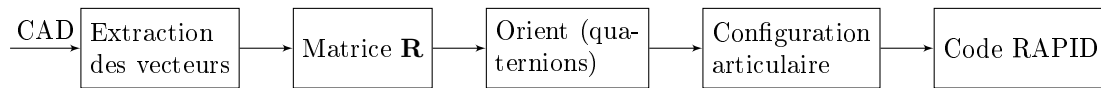


FIGURE 3.33 Cheminement logique du générateur de trajectoires hors-ligne

Extraction des points nominaux à partir du fichier CAD

Un logiciel de CAD permet d'extraire une série de points ainsi que leur normale le long de la surface d'une pièce puis d'échantillonner ces points avec un pas constant (figure 3.34). Les points sont exportés avec un pas de $25.4\ \mu\text{m}$ ($0.001''$) dans un fichier texte. Ce fichier sert de point de départ pour le post-processeur présenté dans les sections suivantes.

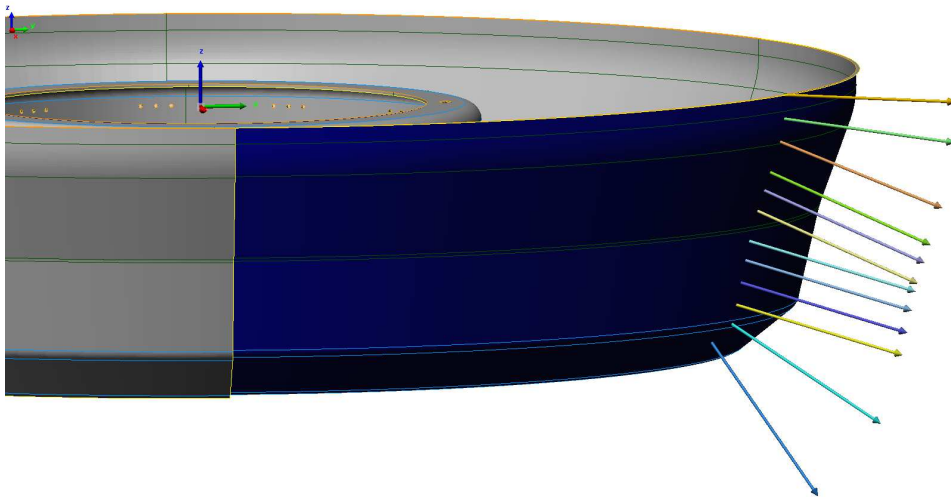


FIGURE 3.34 Extraction des points et des normales sur une section de la pièce

Choix des vecteurs d'orientation et calcul de la matrice **R**

Une fois les coordonnées requises extraites du modèle de la pièce, il faut définir l'orientation de l'outil selon la convention des axes propre au contrôleur.

Vecteur \mathbf{z} : le vecteur \mathbf{z} est choisi normal à la pièce puisqu'il s'agit de l'axe principal de l'outil selon la définition du contrôleur robotique.

Vecteur \mathbf{x} : par convention, le vecteur \mathbf{x} est orienté tangent à la pièce, afin d'orienter l'outil perpendiculairement à la direction d'avance. Le vecteur \mathbf{x} est obtenu à partir de l'axe \mathbf{z} calculé précédemment, projeté dans le plan $\mathbf{x}_0\mathbf{y}_0$ puis tourné de 90° autour du vecteur $\mathbf{z}_0 = [0, 0, 1]$ absolu.

$$\mathbf{x} = \mathbf{R} \left(-\frac{\pi}{2}, \mathbf{z}_0 \right) \mathbf{proj}_{\mathbf{x}_0\mathbf{y}_0}^{\mathbf{z}}, \quad (3.27)$$

Avec $\mathbf{proj}_{\mathbf{x}_0\mathbf{y}_0}^{\mathbf{z}}$ étant la projection du vecteur \mathbf{z} calculé précédemment dans le plan $\mathbf{x}_0\mathbf{y}_0$ du repère pièce.

Vecteur \mathbf{y} : le vecteur \mathbf{y} est obtenu par produit vectoriel afin d'obtenir une base ortho-normale :

$$\mathbf{y} = \mathbf{z} \times \mathbf{x}. \quad (3.28)$$

Matrice de rotation \mathbf{R} : la matrice de rotation définissant l'orientation de l'outil par rapport au repère de travail (ou de la pièce) est enfin construite :

$$\mathbf{R} = [\mathbf{x} \ \mathbf{y} \ \mathbf{z}]. \quad (3.29)$$

Calcul des quaternions pour le contrôleur du robot

Les contrôleurs ABB utilisent les quaternions comme méthode de représentation interne des orientations. Cette méthode a deux principaux avantages en comparaison avec les angles d'Euler, soit une empreinte réduite sur la mémoire système et l'élimination des singularités de représentations (*Orientation representations used within ABB robots controllers* 2000). Cette technique a cependant le désavantage de complexifier la visualisation des rotations par les programmeurs. ABB a donc introduit des outils de conversion vers les angles d'Euler. Les équations qui suivent servent à calculer un quaternion $[q_1, q_2, q_3, q_4]^\top$ à partir des éléments de la matrice de rotation \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix}. \quad (3.30)$$

La première colonne de \mathbf{R} représente les composantes du vecteur $\mathbf{x}_t = [x_1, y_1, z_1]^\top$ de l'outil dans le repère pièce. Il en va de même pour les deuxième et troisième colonnes, exprimant respectivement les vecteurs \mathbf{y}_t et \mathbf{z}_t dans le repère pièce. Un quaternion contient quatre éléments, soient l'angle α de la rotation ainsi que l'axe unitaire autour duquel elle

s'effectue. Ce quaternion doit toujours être unitaire ($q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 = w^2 + x^2 + y^2 + z^2 = 1$), de sorte que les substitutions suivantes sont faites :

$$w = \cos(\alpha/2), \quad (3.31)$$

$$\mathbf{v} = (x, y, z) = \mathbf{u} \sin(\alpha/2). \quad (3.32)$$

Il en découle que le quaternion de rotation \mathbf{q} s'écrit ainsi :

$$\mathbf{q} = [w, \mathbf{v}] \quad w \in \mathbb{R}, \mathbf{v} \in \mathbb{R}^3 \quad (3.33)$$

$$= [w, (x, y, z)] \quad w, x, y, z \in \mathbb{R} \quad (3.34)$$

$$= w + ix + jy + kz \quad w, x, y, z \in \mathbb{R}, i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \quad (3.35)$$

$$= \cos(\alpha/2) + \mathbf{u} \sin(\alpha/2) \quad \alpha \in \mathbb{R}, \mathbf{u} \in \mathbb{R}^3 \quad (3.36)$$

Avec l'angle de rotation $\alpha = 2 \cos^{-1} w$, la matrice de rotation peut s'écrire après simplifications :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 - 2y^2 - 2z^2 & 2xy - 2zw & 2xz + 2yw \\ 2xy + 2zw & 1 - 2x^2 - 2z^2 & 2yz - 2xw \\ 2xz - 2yw & 2yz + 2xw & 1 - 2x^2 - 2y^2 \end{bmatrix}. \quad (3.37)$$

En posant l'égalité entre les matrices de rotation (3.30) et (3.37), il est possible d'isoler les quatre éléments du quaternion :

$$q_1 = \frac{\sqrt{x_1 + y_2 + z_3 + 1}}{2}, \quad (3.38)$$

$$q_2 = \frac{\sqrt{x_1 - y_2 - z_3 + 1}}{2}, \quad (3.39)$$

$$q_3 = \frac{\sqrt{y_2 - x_1 - z_3 + 1}}{2}, \quad (3.40)$$

$$q_4 = \frac{\sqrt{z_3 - x_1 - y_2 + 1}}{2}, \quad (3.41)$$

$$\text{sgn}(q_2) = \text{sgn}(y_3 - z_2), \quad (3.42)$$

$$\text{sgn}(q_3) = \text{sgn}(z_1 - x_3), \quad (3.43)$$

$$\text{sgn}(q_4) = \text{sgn}(x_2 - y_1). \quad (3.44)$$

Le quaternion \mathbf{q} obtenu doit enfin être normalisé avant d'être utilisable par le contrôleur

du robot :

$$\mathbf{q}^\top = [q_1, q_2, q_3, q_4]^\top, \quad (3.45)$$

$$\mathbf{q}^\top = \frac{\mathbf{q}^\top}{\|\mathbf{q}^\top\|}. \quad (3.46)$$

Choix de la configuration des axes du robot

Une coordonnée robot ou *robtarg* contient, en plus de la position et l'orientation de l'outil, un vecteur décrivant la configuration articulaire de quatre articulations du robot en spécifiant le quadrant dans lequel il se situe (figure 3.35). Ce vecteur permet d'éliminer toute singularité de la solution au problème de cinématique inverse et doit être validé au moyen du logiciel RobotStudio de ABB. Il suffit de charger une coordonnée (*robtarg*) dans le module hors-ligne du logiciel pour obtenir une configuration adéquate qui évite les collisions. Pour automatiser cette étape, il faut utiliser un modèle cinématique complet du robot, afin d'obtenir les quadrants adéquats en imposant des limites sur les positions des articulations (en fonction des limites physiques de la cellule et du robot).

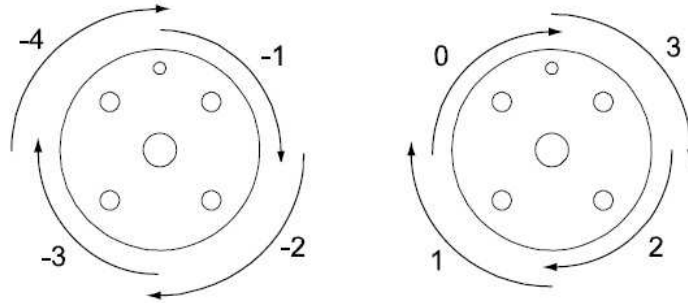


FIGURE 3.35 Spécification du quadrant pour les articulations du robot

Bien qu'il soit non-sécuritaire de fonctionner ainsi, il existe également des commandes permettant de désactiver la vérification des configurations du robot par le contrôleur. Procéder ainsi est risqué car les coordonnées articulaires empruntées par le robot ne seront pas validées au préalable. Il suffit de modifier les états *ConfL* et *ConfJ* pour les déplacements dans l'espace linéaire et articulaire respectivement :

```
\ConfL Off ;
\ConfJ Off ;
```

Programme 3.4 Désactivation de la validation des quadrants pour les coordonnées articulaires

Une façon d'imposer une position articulaire lors d'un déplacement est d'utiliser la commande *moveabsj* plutôt que *moveL* :

```
moveabsj CalcJointT(pLinerRetrait1 , tmskActuel
                  \wobj:=woPoteauLiner), v30 , z0 , tmskActuel;
```

Programme 3.5 Commande du robot en coordonnées articulaires

Post-processeur

Un programme en python exécute les étapes pour convertir les coordonnées dans le repère pièce (Programme 3.6) en cibles compatibles avec le contrôleur. Le post-processeur insère également toutes les déclarations requises pour la gestion des interruptions, la synchronisation de l'axe rotatif et l'affichage sur l'interface de commande, de sorte que le programme généré est prêt à être exécuté (Programme 3.7). Les points obtenus peuvent être visualisés dans RobotStudio sur le modèle de la pièce (figure 3.36).

```
0.000000 176.822100 6.019800 0.000000 1.000000 0.000000
0.000000 176.820398 5.003800 0.000000 0.999844 -0.017648
0.000000 176.796268 3.988130 0.000000 0.999377 -0.035291
```

Programme 3.6 Coordonnées (xyzijk) injectées dans le post-processeur

```
CONST robtarget pLiner_1:=[[-88.41105,-153.1324306,6.0198],
    [0.68301, -0.68301, 0.18301, -0.18301], [-1,0,-3,0],
    [9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget pLiner_2:=[[-88.410199,-153.1309566,5.0038],
    [0.68901, -0.67696, 0.18139, -0.18462], [-1,0,-3,0],
    [9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget pLiner_3:=[[-88.398134,-153.1100594,3.98813],
    [0.69496, -0.67085, 0.17975, -0.18621], [-1,0,-3,0],
    [9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

PROC pathLiner_ID1()
    MoveL pLiner_1, v5, z0, tmskActuel \WObj:=woPoteau;
    MoveL pLiner_2, v5, z0, tmskActuel \WObj:=woPoteau;
    MoveL pLiner_3, v5, z0, tmskActuel \WObj:=woPoteau;
ENDPROC
```

Programme 3.7 Traduction des coordonnées en code interprétable par le contrôleur

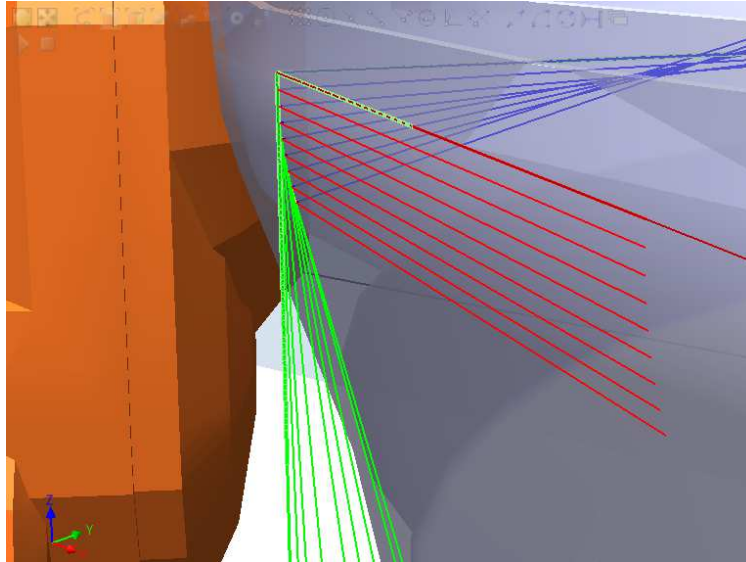


FIGURE 3.36 Visualisation des coordonnées robots dans le repère pièce générées par le post-processeur dans RobotStudio

3.5.4 Synchronisation de la table rotative

Une interruption de type *timer* (équation 3.47) permet d'ajuster en temps réel la vitesse de la table rotative afin de garantir une vitesse d'avance constante. Le rayon momentané R est calculé entre la position de l'outil et l'axe de rotation du repère pièce par le contrôleur à chaque interruption (Programme 3.8) :

$$RPM = \frac{60V_t}{2\pi R}. \quad (3.47)$$

avec V_t étant la vitesse tangentielle (ou vitesse d'avance) en mm/s et R le rayon en mm.

3.5.5 Masquage d'une pièce de révolution

La réalisation d'une bande simple le 4 juin 2012 sur une pièce réelle à partir de prédictions des paramètres de projection a permis de valider le modèle d'application (figure 3.37) développé sur les coupons métalliques. L'expérience démontre que pour une recette établie, le passage d'une application planaire à une application surfacique se fait aisément tant que la vitesse relative et l'espacement outil-pièce demeurent inchangés. Le modèle de déposition est donc complet, ou comporte au moins suffisamment de paramètres (tableau 3.4), puisqu'il permet de produire un résultat répétable uniquement à partir de simulations paramétriques.

La réalisation de bandes multiples (à partir du 13 juin 2012) a permis de valider si les cordons parallèles fusionnent bien entre eux. Un ajustement du paramètre de chevauchement

```

! Calcul du rayon a partir de la position outil
FUNC num mskRfromTarget(robtarget p)
    var num R;
    R := sqrt(pow(p.trans.x,2) + pow(p.trans.y,2));
    return R;
ENDFUNC

! Calcul du RPM
FUNC num mskVt2RPM(num R, num Vt)
    VAR num RPM;
    ! Calculer le RPM en fonction de R et Vt
    RPM := Vt * 60 / ( 2 * pi * R);
    RETURN RPM;
ENDFUNC

! Interruption pour ajuster le RPM dynamiquement
TRAP rpmtrap
    var num R;
    R := mskRfromTarget(CRobT(\ Tool:=toolActuel
        \WObj:=wobjActuel));
    aARPM_NOWAIT mskVt2RPM(R,Vt);
    RETURN;
ENDTRAP

! Configuration de la minuterie a tous les 0.1 s
ITimer 0.1, timeint;
CONNECT timeint WITH rpmtrap

```

Programme 3.8 Synchronisation de la vitesse de l'axe rotatif en fonction de la position de l'outil par rapport au centre de rotation



FIGURE 3.37 Bande de résine simple sur une chambre à combustion

a été requis dans les sections courbes convexes, car l'augmentation de surface à mouiller engendre un manque de résine à ces endroits. Une approche de type méandre est appliquée pour assurer une transition de l'outil entre les deux rangées. Le robot fait un saut rapide au prochain point tout en gardant l'outil activé. Des interruptions aux 0.1 s assurent un ajustement de la vitesse de rotation pour compenser la variation de vitesse tangentielle causée par le déplacement de l'outil. La réalisation d'un tour complet est effectuée en comptant le temps d'une révolution complète (Programme 3.9), plus un certain chevauchement :

$$T = \frac{60}{RPM} \left(1 + \frac{c}{2\pi R} \right) \quad (3.48)$$

L'application sur une surface courbe nécessite que le TCP programmé soit le plus exact possible, puisqu'une petite erreur entre l'orientation de l'outil peut engendrer un grand es-

TABLEAU 3.4 Paramètres décrivant la déposition de résine sur une pièce

Symbole	Variable
p	Pression d'alimentation
v_t	Vitesse tangentielle
off	Offset d'application
dti	Délais d'amorce pour le fusil
dtf	Délais de fermeture pour le fusil
c	Distance de chevauchement
l_n	Dimension outil primaire
l_t	Dimension outil secondaire
ff	Facteur de forme (l_n/l_t)
l_a	Largeur de la bande appliquée

```

! Attendre un tour complet en fonction du RPM
! avec 2mm de chevauchement
waittime 60/RPM*(1+2/(2*PI*R));

```

Programme 3.9 Calcul d'une révolution complète plus un certain chevauchement

pacement entre la buse et le métal, ce qui cause des gâchis. La fabrication d'un outil complètement rigide corrigera ce problème.

Conclusion

L'objectif initial du projet était de démontrer la faisabilité d'automatiser le masquage des chambres à combustion. Plusieurs options ont été étudiées, et une seule a été retenue. Une preuve de concept a été réalisée sous la forme d'une cellule robotisée intégrée et une pièce réelle a été masquée, revêtue au plasma puis démasquée en utilisant le nouveau procédé. Les livrables attendus étaient les suivants :

1. Revue de littérature sur le sujet.
2. Rapports décrivant les procédures pour chaque test et les résultats obtenus.
3. Dessins, code source pour tests et validation.
4. Rapports de progression mensuels.
5. Rapport final couvrant les étapes du projet, des recommandations et tous les résultats obtenus.

Opportunités

La technologie développée dans le cadre de ce projet transcende de loin la projection de revêtement thermique sur les chambres à combustion et est transposable à d'autres familles de pièces. De nombreux procédés de fabrication pour les composants de turbines à gaz requièrent du masquage localisé :

1. Rechargement métallique de boîtier d'engrenages.
2. Revêtement par plasma sur d'autres pièces.
3. Grenaillage de surfaces critiques.
4. Mesure de l'écoulement d'air à travers certaines pièces (aubes, chambres à combustion, diffuseurs).

Les nombreuses analyses effectuées en laboratoire ont permis d'observer une nette amélioration du revêtement thermique liée à l'utilisation du nouveau masque. Lorsque le découpage est effectué au moyen d'une application précise de résine, des gains notables ont été documentés :

- Réduction de la taille des bavures à la source
- Homogénéité de la céramique jusque dans la zone de transition par l'élimination des impuretés dues à la combustion de la colle du ruban
- Élimination de l'éclatement accidentel lié au retrait du ruban

- Contrôle de la température du substrat durant le revêtement au plasma

À ces percées techniques il faut ajouter l'amélioration des méthodes de travail liées à la standardisation de l'outillage, la réduction de problèmes de santé et sécurité au travail et enfin la régularisation du temps de cycle en éliminant de nombreuses sources de variations du procédé actuel.

Prochaines étapes

L'ajout d'un système de vision permettrait de mesurer le profil réel de la pièce pour compenser la trajectoire robot, quel que soit son défaut de forme ou son erreur de positionnement sur la table rotative. En plus de permettre une meilleure qualité d'application, cela permettrait d'inspecter le masque à même la cellule d'application.

Les résines actuelles ne se dégradent aucunement en deçà de 191°C (375°F). Une élévation de cette température critique est en cours, avec deux objectifs de développement à moyen terme. Le premier est de monter cette limite d'endurance à 288°C (550°F). Dans un second temps, on souhaite rehausser cette limite à 343°C (650°F). À la lumière des résultats obtenus à la section 2.2, la première cible de 288°C serait suffisante pour assurer un processus fiable en production, surtout si le procédé comporte un système de refroidissement adéquat. La seconde cible donnerait une zone de confiance confortable. Augmenter la température de résistance de la résine a cependant l'effet de hausser sa température de combustion à plus de 700°C (1300°F), rendant la méthode de retrait par incinération hors de considération.

La compagnie Nordson EFD développe une nouvelle technologie d'applicateurs de fluides qui projette les gouttes une à une plutôt que de chercher à atomiser le produit. Cette méthode serait particulièrement intéressante pour les résines visqueuses, car elles élimineraient le besoin d'être à très courte distance de la pièce lors de l'application.

Le présent mémoire est bien entendu trop succinct pour contenir tous les résultats obtenus durant les deux années qu'a duré ce projet de maîtrise. On y trouve plutôt l'essentiel, pour suivre le chemin parcouru. Une section entière, sur l'optimisation plus globale du procédé de déposition par plasma, n'a pas trouvé sa place dans le texte principal et a été mise en annexe. Ce projet, qui se voulait initialement un simple projet d'automatisation, s'est avéré étonnamment multidisciplinaire, en intégrant des connaissances dépassant largement le domaine du génie mécanique. Après être parti d'une simple idée, ce projet se termine avec une demande de brevet à l'étude. Enfin, ce mémoire résume trop brièvement la complexité et les défis que représentent la fabrication de pièces aéronautiques, la déposition par plasma et la robotisation de ces procédés.

Références

- ANTONIO, J.K., R. RAMABHADHAN et T.-L. LING (1997). “A framework for optimal trajectory planning for automated spray coating”. Dans : *International Journal of Robotics and Automation* 12, no 4, p. 124–134.
- B. HEIMANN, Robert (2008). *Plasma-Spray Coating*. 2nd. Weinheim, Germany : Wiley-VCH. ISBN : 978-3527320509.
- BISSON, J.F. et C. MOREAU (2003). “Effect of Direct-Current Plasma Fluctuations on In-Flight Particle Parameters : Part II”. Dans : *Journal of Thermal Spray Technology* 12(2), p. 7.
- BOSE, Sudhangshu (2007). *High Temperature Coatings*. Burlington, MA : Butterworth-Heinemann. ISBN : 978-0-7506-8252-7.
- BUSSMANN, M., S. CHANDRA et J. MOSTAGHIMI (4000). “Numerical Results of Off-Angle Thermal Spray Particle Impact”. Dans : *Thermal Spray Laboratory, University of Toronto, Toronto, Canada*.
- CAMM, Graham F (1999). “Method for unblocking an obstructed cooling passage”. Brev. US 6,004,620.
- CANDEL, A. et R. GADOW (2009). “Trajectory Generation and Coupled Numerical Simulation for Thermal Spraying Applications on Complex Geometries”. Dans : *Journal of Thermal Spray Technology* 18(5-6), p. 7.
- CHEN, W.R. et al. (2011). “The oxidation behavior of TBC with cold spray CoNiCrAlY bond coat”. Dans : *Journal of Thermal Spray Technology* 20, p. 132–138.
- DEBOUT, Pierre, Hélène CHANAL et Emmanuel DUC (2011). “Tool path smoothing of a redundant machine : Application to Automated Fiber Placement”. Dans : *Computer-Aided Design* 43.2, p. 122 –132. ISSN : 0010-4485. DOI : 10.1016/j.cad.2010.09.011.
- ENGLAND, Gordon. *Thermal Spraying Process*. URL : <http://www.gordonengland.co.uk/ps.htm>.
- FAN, Qun bo, Lu WANG et Fu chi WANG (2007). “Numerical simulation of temperature and velocity fields in plasma spray”. Dans : *Journal of Central South University* 14 (4), p. 496–499.
- FARMER, Gilbert et Jeffrey Arnold FEHRENBACH (2003). “Process of removing a coating deposit from a through-hole in a component and component processed thereby”. Brev. US 6,663,919.
- FERNIHOUGH, John, Alexander BEECK et Andreas BOGLI (2001). Brev. US 6,265,022 B1.

- HAILEY, Samuel I. et John W. ALDEN (1987). “Automated tape laying machine for composite structures”. Brev. US 4,707,212.
- HELLUND, E. J. (1961). *The plasma state*. 1st. New-York : Reinhold Publishing Corporation. ISBN : 61-11888.
- HERTLING, Peter et al. (1996). “Task Curve Planning for Painting Robots Part I : Process Modeling and Calibration”. Dans : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12, no 2, p. 324–330.
- KOKINI, K. (1993). *Ceramic coatings*. 1st. Park Ridge, New Jersey : ASME. ISBN : 0-7918-1021-6.
- MALLOY, James T. (1987). “Bed-of-pins test fixture”. Brev. US 4,701,703.
- NYLEN, P. et al. (1998). “The Modeling of Coating Thickness, Heat Transfer, and Fluid Flow and its Correlation with the Thermal Barrier Coating Microstructure for a Plasma Sprayed Gas Turbine Application”. Dans : *Journal of Thermal Spray Technology* 8 (3), p. 6.
- Orientation representations used within ABB robots controllers* (2000). Proceedings of A Symposium Commemorating the Legacy, Works, and Life of Sir Robert Stawell Ball Upon the 100th Anniversary of Treatise on the Theory of Screws. University of Cambridge, Trinity College.
- SEMENOV, A.S. et al. (2005). “Contact-driven delamination and spalling of coatings due to cyclic shock heating”. Dans : *Thin Solid Films* 471, p. 200–209.
- SHANMUGAVELAYUTHAM, G. et V. SELVARAJAN (2003). “Electrothermal efficiency, temperature and thermal conductivity of plasma jet in a DC plasma spray torch”. Dans : *Pramana Journal of Physics* 61 (6), p. 1109–1119.
- SHANNON, Claude E. (1949). “Communication in the Presence of Noise”. Dans : *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 37, no 1, p. 10–21.
- SLIFKA, A.J. et al. (1998). “Thermal Conductivity of a Zirconia Thermal Barrier Coating”. Dans : *Journal of Thermal Spray Technology* 7(1), p. 4.
- STANKOWSKI, Alexander, Andreas BOGLI et John FERNIHOUGH (2006). “Method of protecting a local area of a component”. Brev. US 7,083,824 B2.
- TINGAUD, O. et al. (2008). “Suspension Plasma-Sprayed Alumina Coating Structures : Operating Parameters Versus Coating Architecture”. Dans : *Journal of Thermal Spray Technology* Volume 17(5-6), p. 662–670.

Annexe A

Optimisation globale du procédé de déposition par plasma

Outre l'utilisation de masques évolué pour protéger les zones critiques des pièces, un ensemble de mesures secondaires peuvent être entreprises pour augmenter soit la qualité ou la productivité du processus dans son ensemble.

A.1 Adhérence du TBC sur des oxydes

Des travaux préliminaires effectués au CNRC à Boucherville ont démontré qu'une couche d'aluminium anodisé déposée par plaquage électrolytique procure des propriétés très intéressantes au substrat métallique. Suite à une déposition par plasma, le revêtement thermique se délamine lors du refroidissement de la pièce (figure A.1). De tels matériaux pourraient servir à la fabrication de masques rigides évolués sur lesquels la maintenance serait réduite et qui seraient "rechargeables" de façon virtuellement infinie.



FIGURE A.1 Délamination d'un dépôt de TBC sur un substrat d'aluminium anodisé

A.2 Masques réutilisables

Les zones de projection secondaires peuvent être masquées au moyen de masques flexibles à usage multiple (figure A.2). Les conditions thermiques et mécaniques y étant grandement réduites, il devient envisageable de réutiliser la majeure partie des matériaux, ce qui réduit à la fois le temps de préparation et le coût en matières brutes. Par exemple, un boîtier d'engrenage qui était préalablement masqué en totalité avec du ruban pourrait être protégé par un chapeau flexible, et seule l'interface entre la zone chaude et la zone protégée serait masquée.



FIGURE A.2 Masque réutilisable pour les boîtiers d'engrenage (image provenant de 'Greentree Shercon')

A.2.1 Anneaux métalliques

Cette technologie est une utilisation directe des revêtements protecteurs développés précédemment, appliqué dans des régions difficiles d'accès. L'objectif serait de fabriquer des anneaux (figure A.3) qui prendraient de l'expansion à l'intérieur des pièces ou qui viendraient serrer la pièce par l'extérieur. Toute accumulation de céramique sur l'outillage engendre une modification des dimensions de ce dernier. L'utilisation de masques réutilisables dans des zones critiques requiert un suivi constant des dimensions de ce dernier et un ébavurage périodique. En utilisant un revêtement protecteur sur les fixtures, sur lequel à la fois le BC et le TC n'adhèrent pas ou peu, on augmenterait grandement la durée de vie de l'outillage, et on réduit les temps d'arrêt des machines de production.



FIGURE A.3 Bagues extensibles

A.3 Programmation hors-ligne

La programmation hors-ligne du robot effectuant le revêtement au plasma peut apporter de nombreux avantages, en prenant en charge des paramètres qui sont actuellement arbitrairement déterminés par l'opérateur lorsque le programme est rédigé manuellement. Il en résulte, pour une même pièce, qu'il y a un programme différent par machine de plasma. Plusieurs paramètres peuvent être pris en compte lors de la programmation hors-ligne :

1. points de saut : des points de déplacements rapides peuvent être ajoutés pour minimiser le temps où le masque est exposé à la flamme
2. temps d'arrêt interpasse : afin d'ajuster le refroidissement entre les passes (voir la section 2.2).
3. angle d'attaque : la direction de projection a un impact direct sur le taux d'adhésion de la céramique sur le substrat (CANDEL et GADOW, 2009), en plus de générer de l'overspray (BUSSMANN, CHANDRA et MOSTAGHIMI, 4000).
4. vitesse de la table rotative : un ajustement en temps réel par interruption assurerait une vitesse d'avance et un taux de déposition constant.

A.4 Répétabilité de la lance au plasma ou plasmatron

A.4.1 Plasmatron

La variabilité de la flamme a de grands impacts sur les paramètres en vol des particules. Ceci inclut leur vitesse, leur température ainsi que leur densité. Ces paramètres influent ensuite directement sur la qualité et la structure de la céramique obtenue. De faibles changements des paramètres opérationnels du plasmatron peuvent avoir de grands impacts sur

le résultat obtenu (BISSON et MOREAU, 2003). Les travaux de (TINGAUD et al., 2008) ont démontré la relation entre des paramètres procédé (nombre de passes, distance de projection, vitesse de projection, température du substrat), chimiques (densité de la poudre, distribution de masse des grains) et l'intégrité du revêtement obtenu (profil et structure de la trace déposée, structure interne de la céramique).

A.4.2 Maintenance

Les sources de variation pouvant faire fluctuer les paramètres d'opération du plasma sont très nombreuses. En voici quelques unes :

- Choix de lance plasma utilisée (F1-45, F1-90, 3MBT)
- Maintenance effectuée (espacement anode-cathode)
- Usure de l'électrode
- Type de contrôle utilisé (puissance fixe ou tension fixe)
- Débits des gaz alimentant le plasma
- Condition du système de refroidissement de la lance

Sans une méthode de contrôle efficace et systématique des équipements, on ne peut garantir la qualité de la céramique.

A.5 Contrôle actif de la température pièce

Un système avec boucle de contrôle active sur la température du substrat pourrait tenir compte de toute situation et accélérer le développement de nouvelles pièces. Les paramètres à surveiller sont :

1. Pression d'air,
2. Nombre de buses, types (aspiration ou soufflantes) et localisation optimisée,
3. Géométrie des buses,
4. Utilisation de la base de la table pour fournir un jet d'air constant.

A.5.1 Modèle de transfert thermique

Les vecteurs de transferts thermiques durant la déposition par plasma ont été étudiés par (NYLEN et al., 1998). En assumant une vitesse et une température uniforme, l'apport de chaleur à la pièce par le jet de plasma peut être exprimé ainsi :

$$q_f = h_f(T_f - T_s) + q_{rad} \quad (\text{A.1})$$

Où q_{rad} est la contribution de la flamme par radiation. Il a été démontré que c'est l'effet convectif qui domine, et que q_{rad} peut être négligé (NYLEN et al., 1998). Les particules qui adhèrent au substrat convertissent leur énergie thermique et cinétique en chaleur suite à l'impact :

$$q_p = h_p(T_p - T_s) \quad (\text{A.2})$$

Les coefficients h_f et h_p peuvent être obtenus sur la base de données expérimentales. Les pertes de chaleur par la pièce se font également par convection et par radiation dans l'environnement.

$$q_{out} = h_e(T_s - T_e) + \epsilon(T_s - T_e)^4 \quad (\text{A.3})$$

L'ajout d'un mécanisme d'extraction de la chaleur, soit à l'air ou bien cryogénique, viendrait affecter le coefficient h_e . En régime permanent, on peut effectuer un bilan des transferts thermiques :

$$q = q_f + q_p - q_{out} \quad (\text{A.4})$$

$$= h_f(T_f - T_s) + h_p(T_p - T_s) - h_e(T_s - T_e) - \epsilon(T_s - T_e)^4 \quad (\text{A.5})$$

La quantification de ces paramètres (h_f, h_p, T_p, T_f) peut se faire via divers outils, notamment un DPV-2000 lors de l'étalonnage d'une recette plasma. La température du substrat T_s peut être suivie au moyen de diverses méthodes, un pyromètre étant le moins invasif. Une boucle de contrôle sur la température des pièces pourrait être implémentée sur la base des équations A.1 à A.4, avec comme commande le taux d'extraction h_e et comme sortie la température du substrat T_s en un ou plusieurs endroits critiques.

Des systèmes conçus à cet effet existent déjà sur le marché, tel le système de la compagnie Air Products. Si ce système ne pouvait pas être adapté aux pièces de Pratt & Whitney Canada pour diverses raisons, la conception d'un système de compensation dynamique serait tout à fait envisageable en jumelant des pyromètres et des régulateurs de pression d'air avec un contrôleur dédié. Ce système ajusterait la pression d'air envoyée vers les pièces en fonction de la mesure obtenue par les capteurs de température.

A.6 Cold spray de la couche métallisante

La couche métallisante est présentement déposée par plasma conventionnel (APS ou *Air Plasma Spray*). Pour que la céramique adhère au substrat, elle doit absolument être dans

un état de fusion, à plus de 4000 C. Cependant, des particules métalliques (comme le BC) pourraient être déposées par d'autres procédés, tel que le cold spray. Il a été démontré qu'un revêtement thermique de type TBC pour lequel la couche métallisante a été effectué par CGSD¹ offre une adhérence accrue et conséquemment une durée de vie en service multipliée, jusqu'à 5 fois (CHEN et al., 2011).

1. Cold Gaz Spray Dynamics